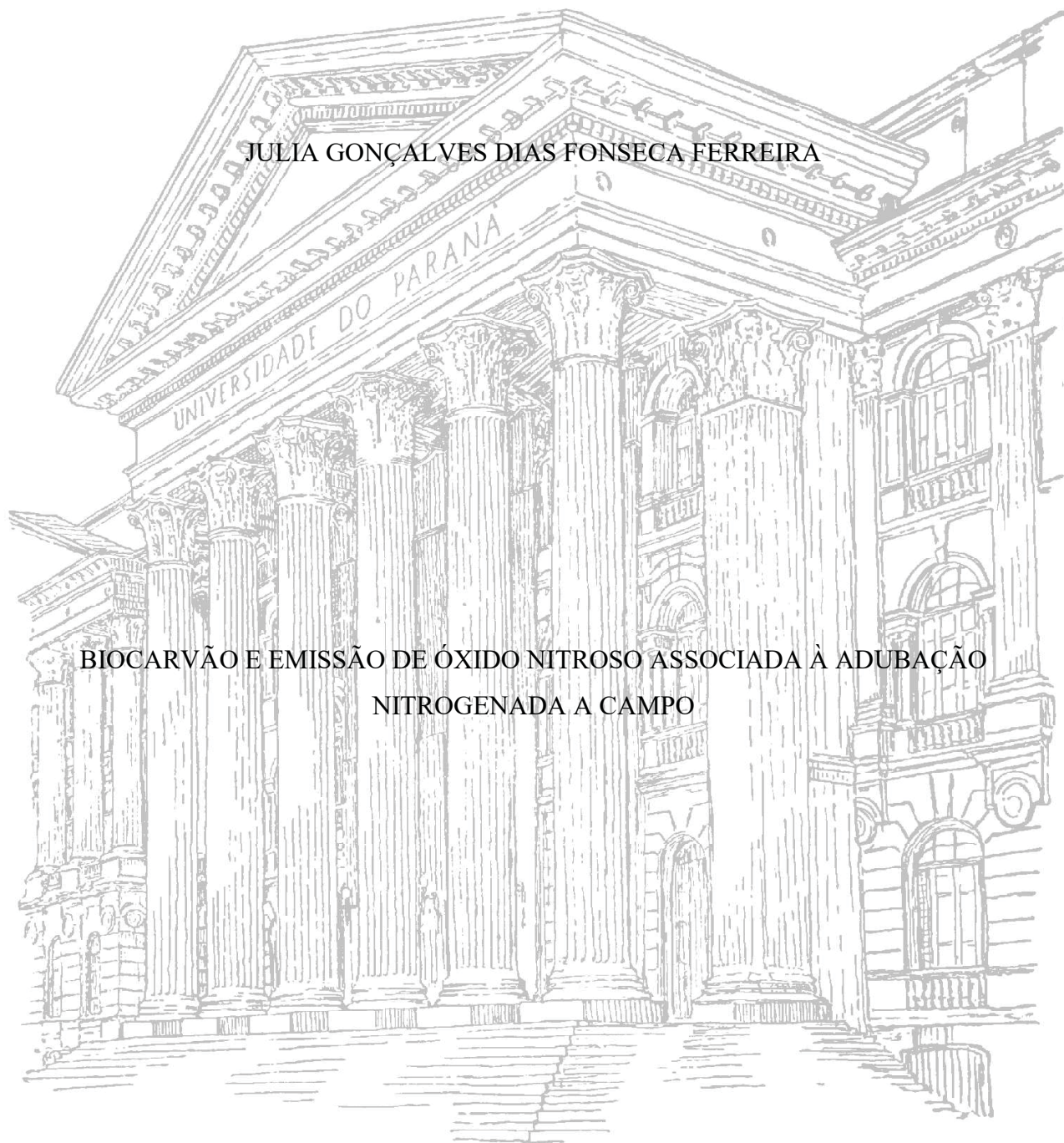


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIA GONÇALVES DIAS FONSECA FERREIRA

BIOCARVÃO E EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO ASSOCIADA À ADUBAÇÃO
NITROGENADA A CAMPO



CURITIBA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIA GONÇALVES DIAS FONSECA FERREIRA

BIOCARVÃO E EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO ASSOCIADA À ADUBAÇÃO
NITROGENADA A CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Co-orientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Co-orientadora: Dra. Claudia Maria Branco de Freitas Maia

CURITIBA

2017

F383b Ferreira, Julia Gonçalves Dias Fonseca
Biocarvão e emissão de óxido nitroso associada à adubação nitrogenada a campo / Julia Gonçalves Dias Fonseca Ferreira. - Curitiba, 2017.
48 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Jeferson Dieckow

Coorientadora: Josiléia Acordi Zanatta

Coorientadora: Claudia Maria Branco de Freitas Maia

1. Biocarvão. 2. Gases estufa. 3. Óxido nitroso. 4. Milho. 5. Aveia. I. Dieckow, Jeferson. II. Zanatta, Josiléia Acordi. III. Maia, Claudia Maria Branco de Freitas. IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.

CDU 634.0.232.42



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Julia Gonçalves Dias Fonseca Ferreira**, intitulada: "**Biocarvão e emissão de óxido nitroso associada à adubação nitrogenada a campo**", do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição da candidata, emitem parecer pela "**APROVAÇÃO**" da referida Dissertação. A candidata atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 22 de fevereiro de 2017.


Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente


Dra. Claudia Maria B. de Freitas Maia, Iº. Examinador


Prof. Dr. Antônio Carlos Vargal Motta, IIº. Examinador


Dra. Josiléia Acordi Zanatta, IIIº. Examinador

“Tudo que existe existe talvez porque outra coisa existe. Nada é, tudo coexiste: talvez assim seja certo. ”

(Fernando Pessoa)

“Na convivência, o tempo não importa. Se for um minuto, uma hora, uma vida. O que importa é o que ficou deste minuto, desta hora, desta vida ”

(Mário Quintana)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem ele não seria possível concluir mais essa etapa.

A minha família, em especial aos meus pais, Sandra Lúcia G. Dias e Sérgio F. Ferreira, por todo o suporte que me deram, me ensinando que as coisas que mais valem a pena na vida são aquelas conquistadas através de muito esforço e dedicação.

Ao Prof. Dr. Jeferson Dieckow, pela orientação, paciência e amizade adquiridas ao longo desta etapa, contribuindo em meu crescimento profissional e pessoal.

A pesquisadora Dra. Josiléia Acordi Zanatta por auxiliar na minha orientação sempre muito disposta em me ajudar.

A pesquisadora Dra. Cláudia Maria Branco de Freitas Maia pelo suporte nas questões relacionadas ao biocarvão.

Aos “manos” do grupo de pesquisa pelo companheirismo adquirido ao longo desses anos de convivência e também pelos incontáveis empurrõezinhos na Kombi. A Carol Amadori (também conhecida por Caroline) pelas horas de conversas jogadas fora, risadas, cafezinhos, chimarrão e até discussões de temas científicos que, sem dúvida nenhuma, fizeram toda a diferença em minha vida. Ao Reinaldo Brevilieri, que além de mano mais velho e um exemplo para mim, nunca hesitou em ajudar em tudo que precisei. A Priscila Simon por compartilhar comigo inúmeras experiências que me incentivaram e enriqueceram mais do que ela se dá conta. A Bruna Ramalho que sempre transmitiu tranquilidade e verdadeira alegria a cada pequena conquista. A Mariana Ibarr por todas as palavras de incentivo que toda vez chegavam no momento certo. Este trabalho só foi possível graças a ajuda de vocês!

Aos estagiários Paola Iungbloog, Taizy Boçon, Marcelo Pereira e Michael Kreusch e em especial ao Bruno Pereira por toda a indispensável ajuda a campo e no laboratório.

Aos meus amigos do Programa, Anne Sass e Luciano Roza, que apesar de “não acreditarem” nessas amostras de ar, estiveram ao meu lado desde a graduação; Alessandra Calegari pelo companheirismo que enchia nossas barrigas e nossas vidas; Verediana Cherobim dona do melhor chimarrão e das histórias mais engraçadas da casinha e, Marcieli Manfio pelas “lamentações” que trazem graça ao dia a dia; Alessandra Santos por dividir comigo momentos “pé frio” restaurando o meu ânimo para continuar. Rangel Consalter cuja presença sempre resultava em risadas sem fim. Vocês tornaram os meus dias mais divertidos!

A Universidade Federal do Paraná, onde eu passei os anos que definiram quem eu sou hoje e o Programa da Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade e contribuição na minha formação profissional.

Aos demais professores do Programa por serem tão acessíveis e pelos valiosos ensinamentos transmitidos. A Denise de Conti, pela incrível habilidade de saber dizer exatamente aquilo que se precisa ouvir.

A EMBRAPA Florestas pela realização das análises cromatográficas e espectrofotométricas.

A empresa SLB do Brasil pelo fornecimento do biocarvão viabilizando o desenvolvimento deste estudo.

A todos, o meu mais sincero,

Muito Obrigada!

RESUMO

O biocarvão (biochar) é capaz de reduzir as emissões de óxido nitroso (N_2O) a partir do solo, pois afeta a disponibilidade de nitrogênio (N), reduzindo o substrato das reações de nitrificação e desnitrificação. Além disso, o solo condicionado com biocarvão pode apresentar um aumento da atividade redutora proporcionada pelos grupos funcionais do biocarvão, o que favorece a emissão de gás nitrogênio. Contudo, grande parte dos trabalhos envolvendo biocarvão e N_2O foram realizados sob condições controladas. Sendo assim, objetivo do estudo foi avaliar o potencial do biocarvão em mitigar as emissões de N_2O a partir de solo associada ao adubo nitrogenado visando a aplicabilidade destes insumos a campo em lavouras de grãos de verão e inverno. O estudo foi realizado na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná localizada no município de Pinhais – PR, primeiro planalto paranaense. Realizaram-se dois experimentos a campo para avaliar o potencial do biocarvão em mitigar as emissões de N_2O . O primeiro, testou métodos de aplicação da ureia em cobertura, à lanço ou no sulco, com e sem biocarvão (Bc) em lavoura de milho (*Zea mays* L.) e o segundo, doses de biocarvão em lavoura de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) As amostras de gás foram coletadas pelo método de câmara estática fechada e analisadas por cromatografia gasosa. No experimento com milho, a aplicação do biocarvão reduziu 43 % a emissão de N_2O , que ocorreu principalmente por desnitrificação. Contudo quando os insumos foram aplicados à lanço não houve efeito dos tratamentos. Já no experimento com aveia preta, fluxo de N_2O foi decorrente da nitrificação, processo que não sofreu influência das diferentes doses de biocarvão, 0; 2 e 10 Mg Bc ha⁻¹. Concluiu-se que o biocarvão reduz a emissão de N_2O associada adubação nitrogenada de cobertura, quando os insumos são aplicados conjuntamente no sulco.

Palavras-chave: Biochar. Gases de efeito estufa. Métodos de aplicação. Doses.

ABSTRACT

Biochar (Bc) is able to reduce nitrous oxide (N₂O) emissions from the soil, as it affects nitrogen (N) availability, reducing the substrate of the nitrification and denitrification reactions. In addition, the conditioned soil with biochar can increase the reducing activity provided by the functional groups of the biochar, which favors the emission of nitrogen gas. However, much of the work involving biochar and N₂O was performed under controlled conditions. Therefore, the aim of the study was to evaluate the potential of biochar in mitigating N₂O emissions from nitrogen associated fertilizer, aiming at the applicability of these inputs to field in summer and winter grain crops. The study was carried out at the Universidade Federal do Paraná's. Experimental Station located in the city of Pinhais - PR, the first plateau of Paraná. Two field experiments were carried out to evaluate the potential of biochar in mitigating N₂O emissions. The first one, tested methods of applying urea in sidedress, broadcast or in the furrow, with and without biochar in maize (*Zea mays* L.) and the second, rates of biochar in oats (*Avena strigosa* Schreb.) Gas samples were collected by the closed static chamber method and analyzed by gas chromatography. In the experiment with maize, the application of biochar reduced the emission of N₂O by 43%, which occurred mainly by denitrification. However, when the inputs were applied broadcast, there was no effect of the treatments. In the experiment with oats, N₂O flow was due to nitrification, a process that was not influenced by the different doses of biochar, 0; 2 and 10 Mg Bc ha⁻¹. It was concluded that the biochar reduces the N₂O emission associated with nitrogenous sidedress fertilization, when the inputs are applied together in the furrow.

Key-words: Biochar. Greenhouse gases. Application methods. Rates.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. HIPÓTESES	14
1.2. OBJETIVOS	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. DESCRIÇÃO GERAL	14
2.2. EXPERIMENTO COM MILHO.....	16
2.2.1. Emissão de N ₂ O	16
2.2.2. Atributos do solo	19
2.3. EXPERIMENTO COM AVEIA PRETA	20
2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	21
3. RESULTADOS	22
3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA.....	22
3.2. EMISSÃO DE N ₂ O AFETADA POR MÉTODOS DE APLICAÇÃO EM LAVOURA DE MILHO	23
3.2.1. Pré-tratamentos.....	23
3.2.2. Pós aplicação do biocarvão	25
3.3. EMISSÃO DE N ₂ O AFETADA POR DOSES DE BIOCARVÃO EM LAVOURA DE AVEIA PRETA.....	38
3.3.1. Pré-tratamentos.....	38
3.3.2. Pós aplicação do biocarvão	39
4. DISCUSSÃO	44
4.1. EMISSÃO DE N ₂ O APÓS O PLANTIO AFETADA PELA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE BASE	44
4.2. EMISSÃO DE N ₂ O AFETADA PELA APLICAÇÃO CONJUNTA DO ADUBO NITROGENADO COM BIOCARVÃO NO SOLO	45
4.2.1. Milho	46
4.2.2. Aveia preta	47
4.2.3. Efeito do biocarvão	47
5. CONCLUSÕES	49

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICES	58

1. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), vem ocasionando mudanças climáticas que não são observadas desde 800 mil anos atrás (IPCC, 2014). A agropecuária brasileira, responsável por mais de um terço das emissões nacionais de GEE, apresentou um aumento na emissão de 44% no período de 1995-2010 (MCTI, 2013) sendo que, apenas os solos agrícolas incrementaram sua emissão em 55,6 Gg CO_2eq . Considerando que o Brasil apresentou uma área de produção de grãos na safra 2014/15 de 58 milhões de ha (CONAB, 2015), tem-se a importância da atividade na regulação das mudanças climáticas.

Com uma participação de 86 % nas áreas brasileiras sob lavoura, o sistema de plantio direto na palha é baseado no não revolvimento do solo, na rotação de culturas e na manutenção da cobertura do solo (FEBRAPDP, 2014). A cultura do milho, segundo CONAB (2015), no ano agrícola de 2014/15 foi a segunda cultura de verão com maior produtividade ($5.382,0 \text{ kg ha}^{-1}$) e área plantada (15.743,7 milhões de hectares). Adubação nitrogenada no milho é baseada no residual das culturas anteriores e na quantidade de matéria orgânica no solo (relação C/N), tendo em vista a sua influência nos processos de mineralização e imobilização do nitrogênio (N) no solo (Mundstock & Silva, 2005). Complementarmente, o parcelamento do adubo nitrogenado (pré-semeadura e em cobertura) pode acarretar em melhores produtividades do que uma única aplicação (Ceretta et al., 2002; Fontoura e Bayer, 2009). Ainda, Pöttker e Wiethölter, 2004 evidenciaram que maiores produtividades da cultura do milho sob plantio direto são alcançadas quando o adubo nitrogenado é incorporado em linha em relação à aplicação a lanço.

O N_2O , apesar de estar em menor quantidade na atmosfera em comparação ao CO_2 , possui um potencial de retenção de radiação infravermelha 310 vezes maior (MCTI, 2013). Na agricultura, as emissões desse gás se dão por meio de processos microbianos complexos associados às práticas de manejo sobre os ecossistemas (FAO, 2014), sendo que no solo as reações de nitrificação e desnitrificação são as principais reguladoras da liberação de N_2O . Como 95% do nitrogênio presente no solo está associado à matéria orgânica, o ciclo deste nutriente é influenciado pela sua dinâmica no solo, através da ação dos microrganismos do solo. (Cantarella, 2007). A partir da decomposição da matéria orgânica do solo, o N orgânico é convertido a amônio (NH_4^+) (mineralizado), ficando disponível à nitrificação, oxidação do NH_4^+ a nitrito (NO_2^-) e a nitrato (NO_3^-) (Zanatta, 2009), o qual por sua alta mobilidade no solo pode ser facilmente perdido por lixiviação. Posteriormente, a partir do NO_3^- pode ocorrer a desnitrificação, quando em condições de anaerobiose, na qual ocorre a transformação do N em

formas gasosas, primeiramente a óxido nítrico (NO), em seguida a N_2O e por último N_2 , que são emitidas para atmosfera (Smith et al., 2003). Ainda, durante a nitrificação, NO_2^- pode ser reduzido liberando N_2O para atmosfera ao invés de ser oxidado a NO_3^- , em um processo chamado de desnitrificação por nitrificantes (Wrage et al., 2001). Todos estes processos são altamente influenciados principalmente pela adubação nitrogenada mineral ou orgânica, por plantas fixadoras de N atmosférico ou pela aplicação de dejetos animais e ainda pelo excesso de umidade no solo (Gregorich et al., 2015).

Estudos acerca de emissões de N_2O a partir de solo cultivado com milho sob plantio direto, como o de Zanatta (2009), demonstram que os picos de emissões de N_2O ocorrem no período pós manejo das plantas de cobertura ($42,9 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), apresentando uma redução nos demais períodos, a exceção da época de aplicação do adubo nitrogenado. Gomes (2006) encontrou comportamento de fluxo de N_2O semelhante, contudo o maior valor verificado foi de $58,0 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Em ambos estudos, o período de maior emissão coincidiu com condições de anaerobiose do solo (altos valores de porosidade preenchida por água e precipitação) e é influenciado pela quantidade de N mineralizado no solo.

O grande desafio atual é reduzir a emissão de N_2O associada à adubação nitrogenada em cereais. Segundo o IPCC, 1% do N aplicado ao solo via fertilizante termina na atmosfera como N_2O . Frente a esse desafio, existem vários estudos que sugerem que o biocarvão (biochar) é capaz de desempenhar um papel positivo na redução nas emissões de N_2O . O biocarvão é a matéria orgânica carbonizada sob atmosfera pobre em oxigênio (pirólise) cuja finalidade é o uso agrícola, visando a captura de carbono no solo e a melhoria de suas propriedades físico-químicas (Sohi, 2012; Maia, 2011). Este foi considerado por Fox & Chapman (2011) umas das nove estratégias mais viáveis na mitigação do aquecimento global.

Entre os principais fatores chave que afetam a influência do biocarvão na emissão de N_2O estão a matéria prima do biocarvão, as condições de pirólise e a forma química do adubo nitrogenado aplicado. Ainda, a dose de biocarvão está diretamente correlacionada com a redução do fluxo de N_2O (Cayuela et al., 2013b).

As condições de produção do biocarvão são determinantes na sua influência no solo (Zhang et al., 2015). A pirólise lenta é mais recomendada e mais utilizada para a produção do biocarvão, uma vez que, além de proporcionar um maior rendimento na produção de sólidos em relação aos outros tipos de pirólise (pirólise rápida e “instantânea”), preserva parte da estrutura dos grupos funcionais dos componentes do material de origem. O que garante esses resultados são as baixas taxas de aquecimento lentas, o emprego de temperaturas relativamente baixas (300 a

600 °C) e um tempo de residência variando de horas a dias (Novotny et al., 2015). Adicionalmente, biocarvão produzido a partir de matéria prima com alto teor de lignina, como madeira, tende a formar uma maior quantidade de estruturas aromáticas condensadas (McBeath et al., 2014) e maior relação C/N (Cayuela et al., 2013b). Sendo assim, o biocarvão de madeira é caracterizado por apresentar uma baixa CTC (em média 23,5 cmol_c kg⁻¹), grupos funcionais ácidos e poucos componentes de C lábil quando comparado a valores observados em biocarvões oriundos de matérias-primas como resíduos de herbáceas, gramíneas e leguminosas (Nguyen et al., 2017).

O biocarvão pode reduzir a emissão de N₂O a partir do solo afetando a disponibilidade de N mineral. Cayuela et al. (2013a) observaram que a aplicação de biocarvão com alta relação C/N reduz a emissões de N₂O, atribuindo este efeito a imobilização microbiana de N. Contudo, a taxa de imobilização de N depende da proporção entre o carbono (C) facilmente mineralizável e o C biologicamente recalcitrante (Nguyen et al., 2017). O NH₄⁺ e NO₃⁻ presentes no solo podem ser fortemente adsorvidos ao biocarvão, como consequência da sua superfície funcionalizada e alta porosidade (alta superfície interna), promovendo um encapsulamento destes íons (Mukherjee et al., 2011; Clough et al., 2013).

Os mecanismos envolvidos na nitrificação e desnitrificação podem sofrer influência da aplicação do biocarvão no solo. O aumento da porosidade e a diminuição da densidade com o uso do biocarvão, incrementam a aeração do solo. Isto em conjunto com a capacidade do insumo de adsorver inibidores de microrganismos nitrificantes, pode estimular a nitrificação (Berglund et al., 2004; Mukherjee e Lal, 2013). Um aumento da atividade redutora proporcionada pelos grupos funcionais do biocarvão, leva a maior eficiência da desnitrificação. Esse fator é favorecido por uma alta concentração de anéis aromáticos, característica de biocarvões com baixa relação H/C (Cayuela et al., 2015).

Este trabalho teve como suas premissas que uns dos principais problemas mundiais está no aumento da produção de alimentos, e portanto, os estudos devem ser focados em lavoura de cereais e pastagens (Smith et al., 2016). Entre os estudos que avaliaram a influência do biocarvão na emissão de GEE, 90 % foram realizados em casa de vegetação ou laboratório, contra apenas 10 % a campo (Zhang et al., 2016). Em meta-análise, Cayuela et al., 2015 verificaram redução de 54 % na emissão de N₂O em experimentos realizados em casa de vegetação com o uso do biocarvão, enquanto que a campo esse valor diminui para 28%.

A grande quantidade de estudos acerca dos mecanismos de interação com o N e sua relação com a emissões de N₂O, contudo sem um entendimento consensual sobre esta questão,

demonstra a necessidade de avaliação da influência do biocarvão sobre as transformações do nitrogênio que ocorrem no solo e da sua potencial capacidade de mitigar as emissões de gases do efeito estufa em sistemas agrícolas de produção.

1.1. HIPÓTESES

- A aplicação do biocarvão reduz a emissão de N_2O associada à adubação nitrogenada, pois o biocarvão influencia a dinâmica do nitrogênio no solo.
- A aplicação de biocarvão conjunta com o adubo nitrogenado no sulco diminui a emissão de N_2O em relação à aplicação a lanço, devido ao maior contato entre os insumos quando em sulco.
- O aumento da dose de biocarvão diminui as emissões de N_2O em função da maior cobertura do solo.

1.2. OBJETIVOS

- Verificar o potencial do biocarvão em mitigar as emissões de N_2O a partir do solo associada à adubação nitrogenada, visando a aplicabilidade destes insumos a campo em lavouras de grãos de verão e inverno.
- Definir a forma de aplicação de adubo nitrogenado em conjunto com o biocarvão, a lanço ou no sulco, que resulta na menor emissão de N_2O .
- Avaliar a influência do aumento da dose de biocarvão aplicado no solo sobre as emissões de N_2O .

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido por meio da realização de 2 experimentos a campo para avaliar o potencial do biocarvão (Bc) em mitigar as emissões de N_2O . O primeiro testou métodos de aplicação da ureia e do biocarvão em lavoura de milho (*Zea mays* L.) e o segundo, doses de biocarvão em lavoura de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.).

2.1. DESCRIÇÃO GERAL

A área dos experimentos está localizada na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, em Pinhais – PR, primeiro planalto paranaense. O clima, classificado segundo Köppen, é subtropical úmido mesotérmico (Cfb), caracterizado por precipitações bem distribuídas ao longo do ano (média anual de 1490 mm), verões frescos (temperatura média do

mês mais quente de 26,6 °C) e invernos (temperatura média do mês mais frio 9,8°C) com ocorrência frequente de geadas (SIMEPAR, 2015). O solo, de textura argilosa, é um CAMBISSOLO HÁPLICO (Sugamosto, 2002) e inicialmente apresentou níveis de nutrientes considerados altos ou muito altos (TABELA 1).

TABELA 1. Características químicas e físicas iniciais do solo, da camada 0-20 cm. Pinhais-PR. 2015.

pH CaCl ₂	pH SMP	Al	H+Al	K	Ca	Mg	SB
-----cmol _c dm ⁻³ -----							
5,1	5,4	0,38	10,39	0,40	7,1	2,8	10,6
P	C	CTC	V	m	Areia	Silte	Argila
mg dm ⁻³	g dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	(%)	(%)	-----g kg ⁻¹ -----		
22,3	40,2	20,99	51	3,6	342	207	451

O biocarvão utilizado em ambos experimentos é oriundo de pirólise lenta a 350 °C de cavaco de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) fornecido pela empresa SLB do Brasil, cujas características estão apresentadas na TABELA 2. Para aplicação no solo, o biocarvão foi moído até passar por peneira de malha 4 mm.

TABELA 2. Características químicas do biocarvão de cavaco de eucalipto.

Umidade	Cinzas a 550 °C	Cinzas a 850 °C	Materiais Voláteis	Carbonatos	pH CaCl ₂
-----%					
8,20	1,50	1,10	10,20	> 0,40	8,30
C	N	H	Razão Molar	Razão Molar	
-----%			H/C	O/C	
92,20	0,30	2,01	0,26	0,03	

Valores fornecidos pela empresa SLB do Brasil, a partir de análise realizada de acordo com métodos recomendados pelo European Biochar Certificate (<http://www.european-biochar.org/en>).

2.2.EXPERIMENTO COM MILHO

A implantação do experimento ocorreu em 08 de dezembro 2015, com o plantio de milho na estação de verão. O manejo da lavoura foi composto de adubação baseada na recomendação local para a cultura juntamente com as características de fertilidade do solo e de capinas manuais realizando-se o controle de plantas espontâneas. A adubação (ureia – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) foi parcelada em duas aplicações, sendo 28 kg N ha^{-1} de base, no sulco de plantio, e o restante (172 kg N ha^{-1}) em cobertura, com o milho no estágio V6.

O experimento baseou-se em quatro tratamentos de adubação nitrogenada em cobertura do milho, associada ou não com aplicação de 2 Mg ha^{-1} de biocarvão:

- Aplicação do adubo nitrogenado à lanço (N Lanço);
- Aplicação do adubo nitrogenado no sulco (N Sulco);
- Aplicação do adubo nitrogenado misturado ao biocarvão, ambos à lanço (N+Bc Lanço);
- Aplicação do adubo nitrogenado misturado ao biocarvão, ambos no sulco (N+Bc Sulco).

Os tratamentos com aplicação à lanço tiveram os insumos distribuídos uniformemente por toda a parcela. Para os demais tratamentos abriu-se um sulco com aproximadamente 0,10 m de largura e de profundidade no centro de cada entrelinha de plantio do milho, totalizando 5 sulcos por parcela (FIGURA 2b). Em cada sulco aplicou-se um quinto da dose de N-ureia e/ou biocarvão utilizada na aplicação à lanço. Sendo assim, considerando a largura do sulco e quantidade aplicada de cada insumo, a dose de biocarvão e de N aplicada em cada sulco foi de 16 Mg Bc ha^{-1} e $1376 \text{ kg N ha}^{-1}$, respectivamente.

Cada parcela possuía 20 m^2 ($4,0 \times 5,0 \text{ m}$), contendo cinco linhas de plantio do milho com espaçamento de 0,8 m. O delineamento experimental é de blocos ao acaso, com cinco repetições decorrendo em uma área com 20 parcelas (400 m^2).

2.2.1. Emissão de N_2O

As coletas de gases ocorreram pelo método da câmara estática fechada, conforme adaptação de Mosier (1989) e Parkin et al. (2014). Nesse método as câmaras de coletas de gás são encaixadas em bases metálicas redondas (0,32 m de diâmetro) que permanecem no campo durante todo o período de monitoramento. Cada coleta foi composta de quatro tomadas, nos tempos 0; 15; 30 e 45 minutos após o fechamento da câmara, possibilitando a determinação da taxa de emissão do N_2O . As sessões de coleta tiveram início às 09:00 horas da manhã.

O procedimento de coleta de gás se deu por meio da utilização de seringas de polipropileno de 20 mL, que são acopladas em válvulas fixadas na parte superior das câmaras. O conteúdo das seringas foi transferido separadamente para vials (frascos de vidro) e levado à análise cromatográfica.

A determinação da concentração dos gases foi realizada via cromatografia gasosa pelo equipamento GC - Trace 1310 (Embrapa Florestas), que possui detector de captura de elétrons (ECD), o que permite a avaliações de N₂O. Conhecendo-se a concentração do gás e o volume total interno da câmara, calculou-se o volume de gás contido na câmara. A partir do volume de gás na câmara e temperatura interna da câmara (medida durante a coleta), pressão atmosférica, e constante universal do gás ideal (R), obteve-se, o número de mols (n) e, a partir disso, a quantidade (massa) do gás contido na câmara (EQ. 1).

A taxa de emissão é obtida por meio do coeficiente angular da reta, que é calculado a partir do incremento da massa do gás contido na câmara, durante o tempo em que a câmara permaneceu no solo acoplada à base (EQ. 1).

$$\text{Fluxo N} - \text{N}_2\text{O} = \frac{d[\text{N}_2\text{O}]}{dt} \times 28 \times \frac{PV}{RT} \quad (1)$$

Onde: Fluxo N-N₂O é a taxa de emissão (µg N m⁻² h⁻¹), [N₂O] é a concentração do gás (µg g⁻¹), t é o tempo (h), 28 é massa molar do nitrogênio (g mol⁻¹), P é a pressão atmosférica (1 atm), V é volume da câmara de coleta de gás (L), R é a constante universal dos gases (0,0821 L.atm K⁻¹ mol⁻¹) e T é temperatura interna da câmara (K).

A fim de caracterizar o sistema, foram realizadas outras quatro avaliações de emissão de N₂O antes da adubação nitrogenada de cobertura (FIGURA 1). No dia 25 de janeiro de 2016 foi feita a aplicação dos tratamentos sendo as doses ministradas 2 Mg ha⁻¹ de biocarvão e 172 kg N ha⁻¹ de N-ureia. Após dois dias, iniciou-se as o monitoramento dos fluxos de gases com a finalidade de verificar a influência dos tratamentos na emissão de N₂O. A frequência das coletas foi maior logo a após a aplicação do adubo e com um aumento gradativo até o final do ciclo da cultura.

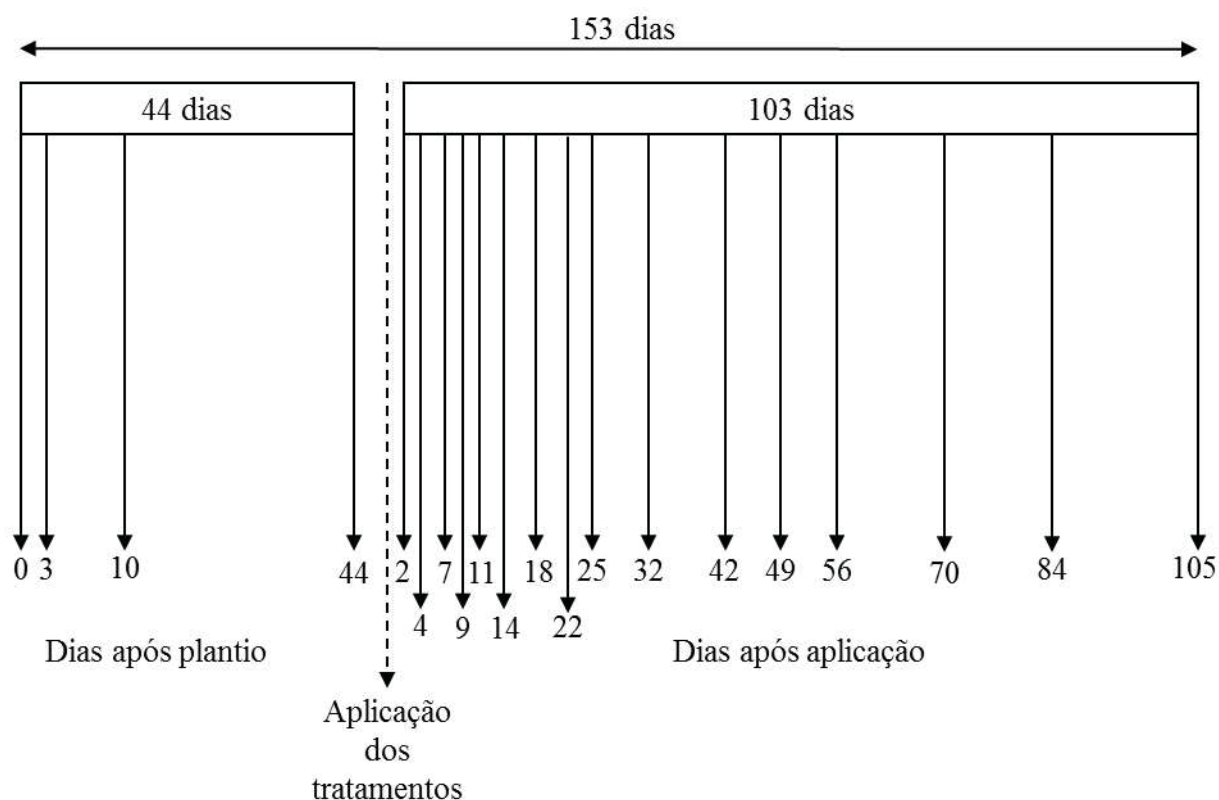


FIGURA 1. Monitoramento dos fluxos de N₂O em dias após plantio e dias após aplicação dos tratamentos no solo com milho. Pinhais-PR, 2015-16.

Com a intenção de melhor avaliar a influência da forma de aplicação nas variáveis, foram colocadas duas bases de coleta de gás centralizadas na entrelinha de plantio e duas na linha de plantio, por parcela experimental (FIGURA 2a). Ainda, todas as coletas de solo bem como todas as análises foram feitas na entrelinha e linha de forma separada. Através da média dos dados obtidos na entrelinha e na linha foi possível avaliar o sistema como um todo (área total).

A emissão acumulada de N₂O foi obtida pela integração da curva de taxa de emissão, ao longo dos períodos de coleta (pré e pós aplicação do biocarvão). Os valores obtidos de emissão de acumulada em área total foram transformados de kg N-N₂O ha⁻¹ para kg CO₂eq ha⁻¹ por meio da EQ. 2.

$$N_2O \text{ (kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}\text{)} = N_2O \text{ (kg N ha}^{-1}\text{)} \times \frac{44 \text{ (massa molar N}_2\text{O)}}{28 \text{ (massa molar N}_2\text{)}} \times 310 \quad (2)$$

Onde: 310 é o potencial de aquecimento global do N₂O (MCTI, 2014).

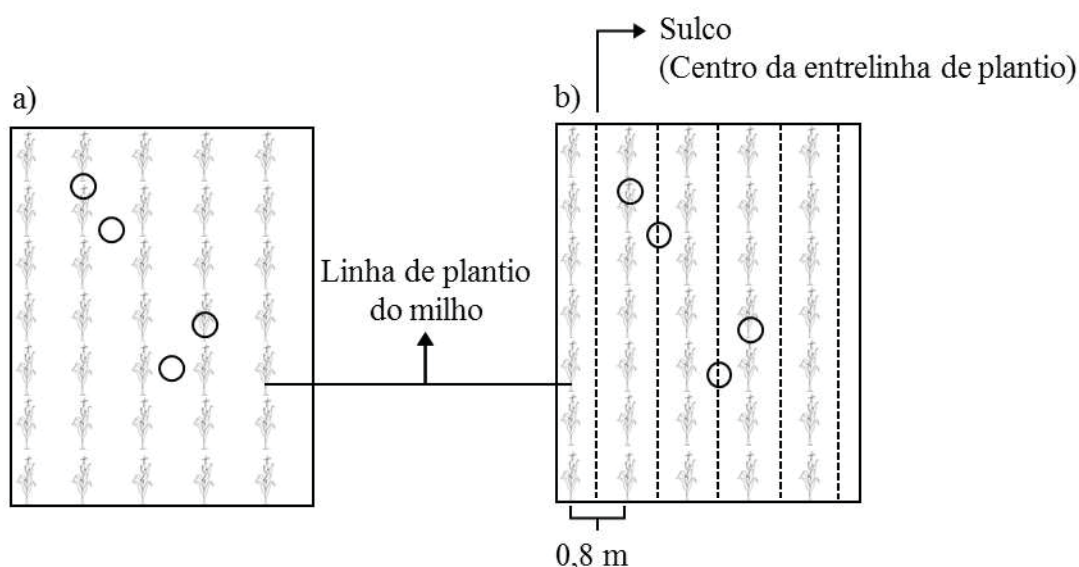


FIGURA 2. Localização das bases de coletas de gás na parcela experimental (a) e do sulco para aplicação dos insumos (b). Pinhais-PR, 2016.

O fator de emissão (FE), que representa quanto do N aplicado no solo foi emitido na forma de N_2O , foi calculado utilizando os valores de emissão acumulada de N_2O e emissão acumulada basal de N_2O , estimada a partir do valor médio dos fluxos observados nas últimas três coletas, e da quantidade de N aplicada no solo (EQ. 3).

$$FE = \frac{N-N_2O_{total} \text{ (com aplicação dos insumos)} - N-N_2O_{total} \text{ (basal)}}{N_{aplicado} \text{ (ureia)}} \times 100 \quad (3)$$

Onde: FE é o fator de emissão (%); $N-N_2O$ é emissão acumulada ($kg\ N\ ha^{-1}$) e N aplicado é quantidade de N aplicado ao solo na forma de ureia ($kg\ N\ ha^{-1}$).

2.2.2. Atributos do solo

Para cada sessão de avaliação de emissão de N_2O foi feita análise da concentração de NH_4^+ e de NO_3^- do solo. Coletou-se amostras em cada parcela com auxílio de trado calador, na camada de 0-5 cm. Em laboratório, com a utilização de solução de KCl $1\ mol\ L^{-1}$ e agitação durante uma hora, extraiu-se N inorgânico de 5 g da amostra de solo úmido. Posteriormente, analisou-se o extrato por espectrofotometria em sistema de análise por injeção em fluxo (FIA) (Hambridge a; b, 2007) (EMBRAPA Florestas). A intensidade de NH_4^+ e de NO_3^- , trata-se da integral da curva de concentração, estimando um índice que representa o N mineral que esteve presente no sistema durante todo o período de coleta (ciclo de cada cultura).

A partir das mesmas amostras de solo utilizadas para determinação de N inorgânico, quantificou-se a umidade gravimétrica do solo. Para isso, uma parte de cada amostra teve sua massa determinada, seca em estufa a 105 °C e a massa novamente determinada. A partir dos valores de umidade gravimétrica e densidade do solo, calculou-se a porosidade preenchida por água (PPA) (EQ. 4).

$$PPA = \frac{D_s \times U}{\left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right)} \times 100 \quad (4)$$

Onde: PPA é a porosidade preenchida por água (%), U é umidade gravimétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e D_p é a densidade de partículas (Mg m^{-3}).

A densidade do solo foi obtida por meio da relação da massa de solo amostrado com auxílio de anel volumétrico e o volume do mesmo. A determinação da densidade de partículas consistiu na adição de 20 g de solo seco em um balão volumétrico de 50 mL, o qual teve seu volume completado com álcool etílico. O valor encontrado a partir da razão entre a massa de solo e diferença entre o volume de álcool utilizado e 50 mL corresponde à D_p do solo estudado.

A temperatura do solo foi medida a cada coleta de gás, empregando termômetros digitais do tipo espeto, na profundidade de 5 cm, próximo de cada ponto de coleta na parcela, no mesmo momento da amostragem de gás.

2.3.EXPERIMENTO COM AVEIA PRETA

A semeadura da aveia preta foi realizada no dia 29 de junho de 2016 na estação de inverno. A adubação nitrogenada consistiu da aplicação do fertilizante nitrogenado (ureia) em cobertura 44 dias após a germinação (19 de agosto de 2016).

Os tratamentos constituíram-se de três doses de biocarvão:

- 0 Mg ha^{-1} ;
- 2 Mg ha^{-1} ;
- 10 Mg ha^{-1} .

As parcelas foram dimensionadas com 1,75 x 2,00 m ($3,50 \text{ m}^2$), contendo aproximadamente dez linhas de aveia preta com um espaçamento de 0,17 m. O delineamento é de blocos ao acaso com 8 repetições, resultando em 24 unidades experimentais.

O biocarvão foi aplicado no solo, à lanço, dois dias antes da adubação nitrogenada de cobertura, quando se aplicou 110 Kg N ha⁻¹ na forma de ureia (17 de agosto de 2016). Assim como na cultura do milho, foram realizadas quatro coletas de gás antes da fertilização, sendo que a primeira ocorreu no mesmo dia do plantio da aveia preta. No dia 22 de agosto de 2016 iniciou-se o monitoramento dos fluxos de N₂O, que teve a sua frequência reduzida conforme se aproximava o final do ciclo da cultura de inverno (FIGURA 3). As medições e determinações da emissão de N₂O foram realizadas conforme descrito no item 2.2.1 e dos atributos do solo conforme item 2.2.2.

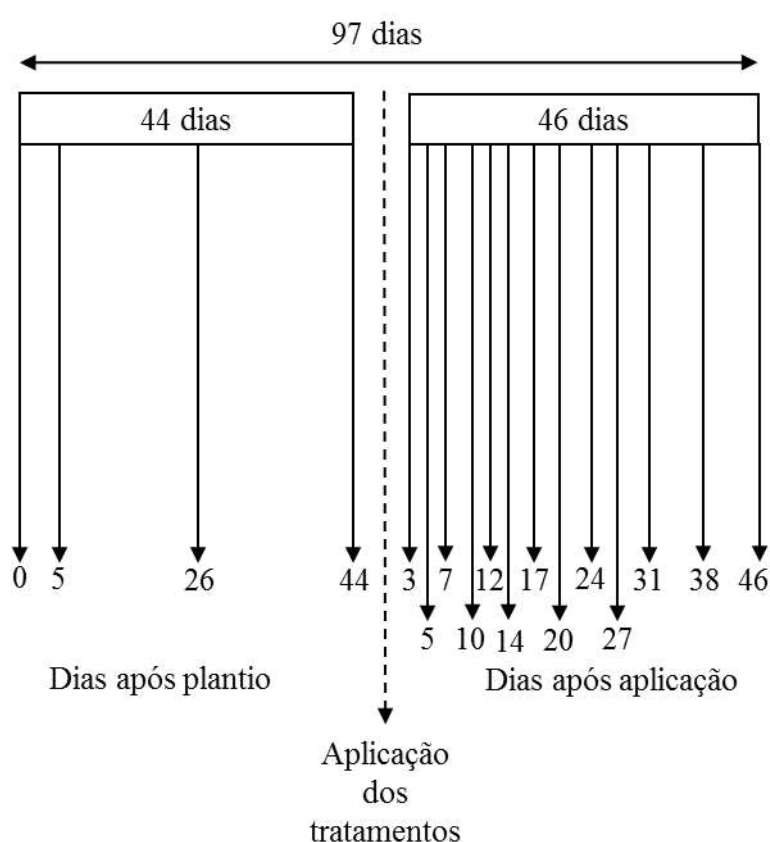


FIGURA 3. Monitoramento dos fluxos de N₂O em dias após plantio e dias após aplicação dos tratamentos no solo com aveia preta. Pinhais-PR, 2016.

2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada baseando-se no delineamento experimental blocos ao acaso. Os resultados foram submetidos à análise de variância ANOVA. Teste de Tukey foi aplicado para comparação de médias. A relação entre as variáveis foi determinada por meio de

regressão simples e regressão linear múltipla e pelo teste de correlação simples. Todas as análises foram realizadas a 5 % de probabilidade.

3. RESULTADOS

3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA

Durante o experimento com milho a precipitação pluviométrica foi de 830 mm, a precipitação média diária de 5,4 mm d-1 e temperatura média diária de 20,4 °C (FIGURA 4). Para o experimento com aveia preta a precipitação de 384 mm, a precipitação média diária de 4,0 mm d-1 e a temperatura média diária 14,1 °C. Sendo assim, o experimento com milho foi conduzido no período mais chuvoso.

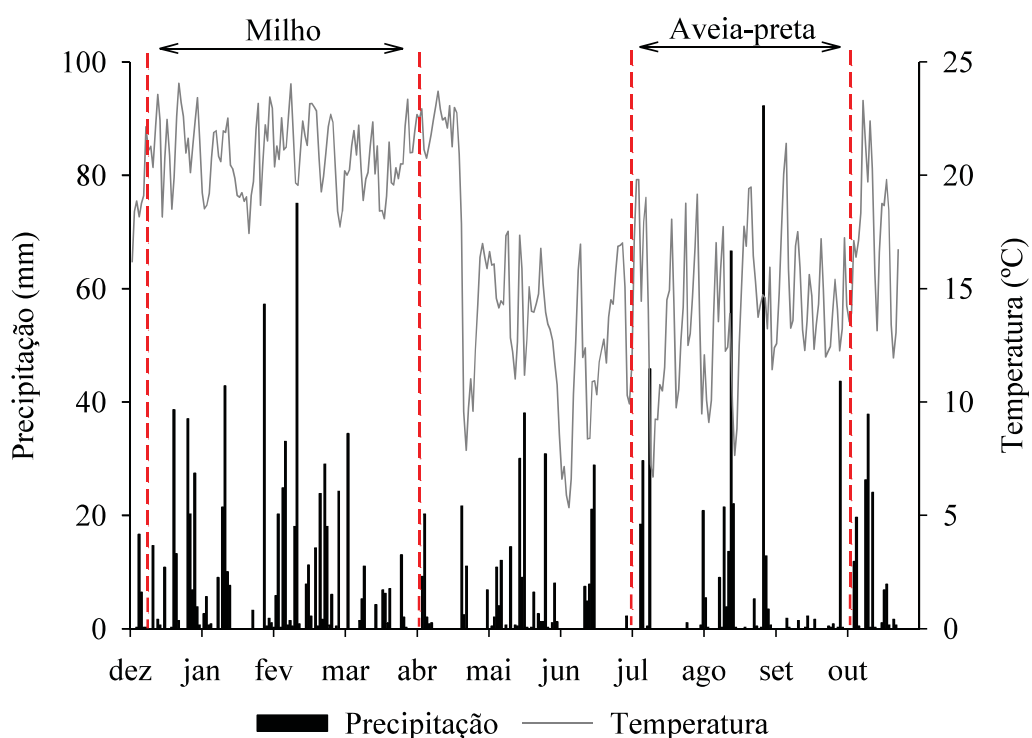


FIGURA 4. Precipitação pluviométrica diária e temperatura média diária do ar durante o período de avaliação das emissões de N₂O nos experimentos de milho e aveia preta. Pinhais-PR, 2015-16. Fonte: SIMEPAR.

3.2. EMISSÃO DE N₂O AFETADA POR MÉTODOS DE APLICAÇÃO EM LAVOURA DE MILHO

3.2.1. Pré-tratamentos

O pico de emissão de N₂O, em consequência da adubação nitrogenada de base, ocorreu aos dez dias após o plantio e foi observado na linha de plantio do milho (641 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (FIGURA 5a). Em relação a entrelinha de plantio, que não recebeu a adição de nitrogênio, o maior fluxo de N₂O foi de 167 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ aos dez dias após o plantio. Aos 44 dias após o plantio, todos os tratamentos apresentaram um decréscimo nos valores de emissão abaixo ao verificado antes do plantio (zero dias após o plantio).

As concentrações de NH₄⁺ e NO₃⁻ na linha de plantio foram maiores 3 dias após plantio na entrelinha de plantio, 37,9 e 4,3 mg N kg⁻¹ respectivamente (FIGURA 5b;c). Os menores valores ocorreram na linha (15,6 mg N kg⁻¹) e entrelinha (14,6 mg N kg⁻¹) em relação ao NH₄⁺ e na linha referente ao NO₃⁻ (2,1 mg N kg⁻¹).

Os fluxos de N₂O apresentaram relação com a porosidade preenchida por água ($p=0,0164$), obtendo-se um coeficiente de determinação de $R^2=0,45$ (FIGURA 5d). A relação entre essas variáveis foi direta, sendo que um aumento na PPA resultou em maiores emissões de N₂O a partir do solo. Quanto a temperatura do solo, esta não se relacionou com o fluxo do gás.

Aos 44 dias após o plantio não se verificou diferenças entre linha e entrelinha para nenhuma das variáveis avaliadas. Os dados obtidos em área total, por se tratarem da média, demonstraram comportamentos intermediários aos descritos para linha e entrelinha de plantio do milho.

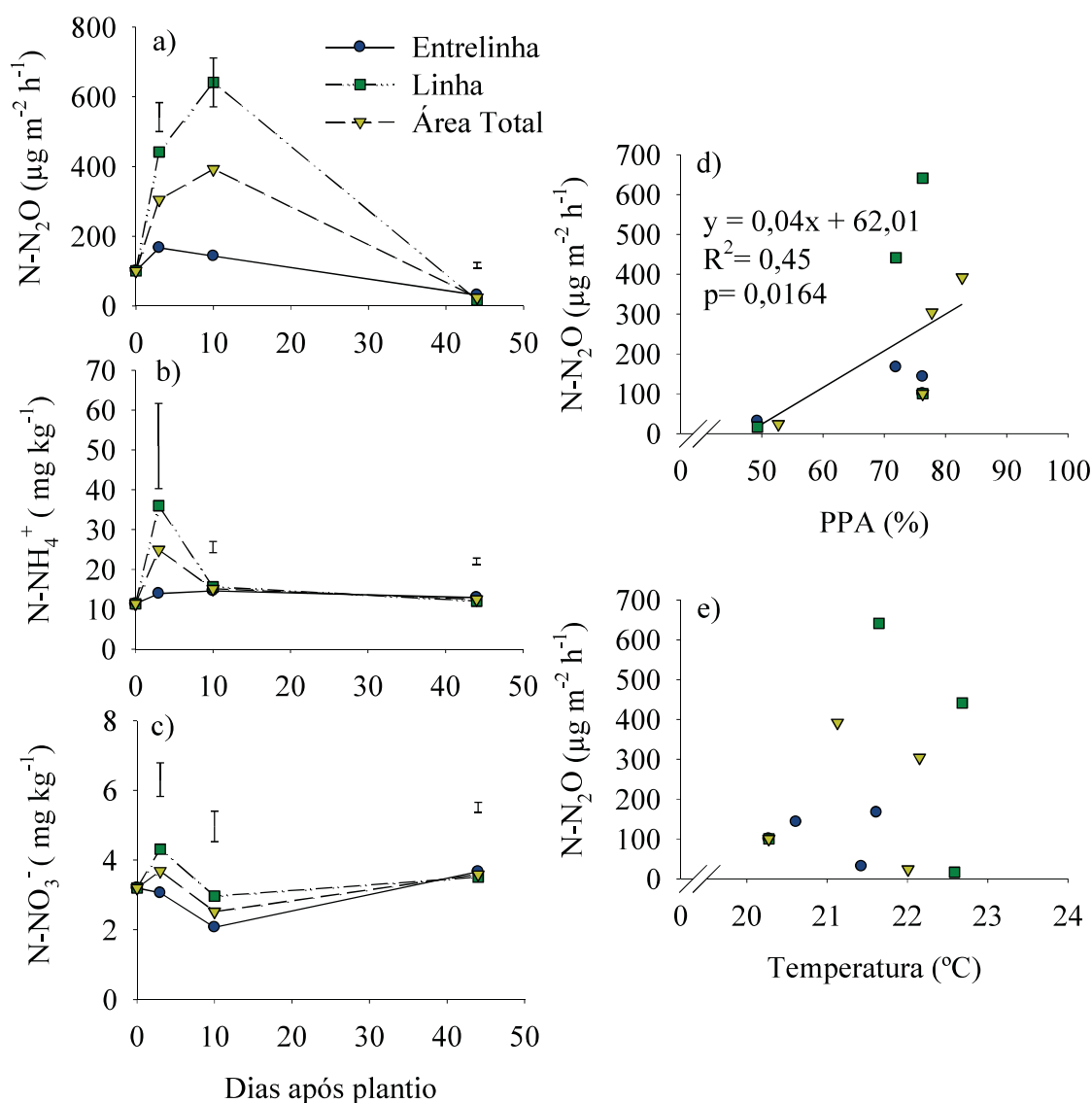


FIGURA 5. Fluxo de óxido nitroso (N₂O) (a), concentração de amônio (NH₄⁺) (b) e nitrato (NO₃⁻) no solo na camada 0-5 cm (c), relação entre o fluxo de N₂O e porosidade preenchida por água (PPA) (d) e temperatura do solo (e) após plantio e adubação nitrogenada de base. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os tratamentos constituem da entrelinha e linha de plantio de milho e área total. Pinhais-PR, 2015-16.

A maior emissão acumulada de N₂O no período pós plantio do milho (392 mg N m⁻²) e a maior intensidade de NO₃⁻ (0,15 g N kg⁻¹ d⁻¹) foram observados na linha de plantio (TABELA 3). Os valores obtidos em área total caracterizaram a área experimental com emissão acumulada de N₂O de 2,3 kg N ha⁻¹, intensidade de NH₄⁺ de 0,68 g N kg⁻¹ d⁻¹ e de NO₃⁻ de 0,14 g N kg⁻¹ d⁻¹.

TABELA 3. Emissão acumulada de óxido nitroso (N_2O) e intensidade de amônio (NH_4^+) e de nitrato (NO_3^-) no solo na entrelinha e linha de plantio do milho e em área total após plantio e adubação nitrogenada de base. Pinhais-PR, 2015-16.

	Emissão acumulada de $\text{N-N}_2\text{O}$	Intensidade de NH_4^+	Intensidade de NO_3^-
----- Em 44 dias -----			
	(mg N m^{-2})	($\text{g N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	
Entrelinha	109,5b	0,61a	0,12b
Linha	392,2a	0,76a	0,15a
	(kg N ha^{-1})	($\text{g N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	
Área Total	2,3	0,68	0,14

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre entrelinha e linha de plantio do milho pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

3.2.2. Pós aplicação do biocarvão

A porosidade preenchida por água na entrelinha, linha e área total não diferiu entre os tratamentos, sendo que o maior valor foi de 80 % na linha de plantio no tratamento N Lanço e menor de 47 % na entrelinha de plantio pelo N+Bc Lanço (FIGURA 6). Durante o período de quatro a 49 dias após aplicação observou-se os maiores valores de PPA que foram em sua grande maioria acima de 60%. A temperatura do solo, que variou de 18,9 a 24,6 °C, não foi afetada pelos tratamentos aplicados ou pela entrelinha e linha de plantio do milho.

Os fluxos de N_2O avaliados na entrelinha de plantio do milho apresentaram o pico de emissão aos 18 dias após a aplicação dos tratamentos, sendo que o maior valor observado foi de $1380 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ pelo tratamento N Sulco (FIGURA 7a). Sob o mesmo método de aplicação, o tratamento que adicionou o biocarvão ao solo (N+Bc Sulco) reduziu o fluxo de N_2O associado ao adubo nitrogenado em $453 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ na ocasião do pico de emissão. Durante o período de sete a 25 dias após aplicação o tratamento N Lanço foi o que estaticamente mais emitiu N_2O . Após os 56 dias após aplicação não se verificou diferença entre os tratamentos, com a menor emissão sendo de $20,8 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, abaixo dos valores observados no início do experimento antes da aplicação do N.

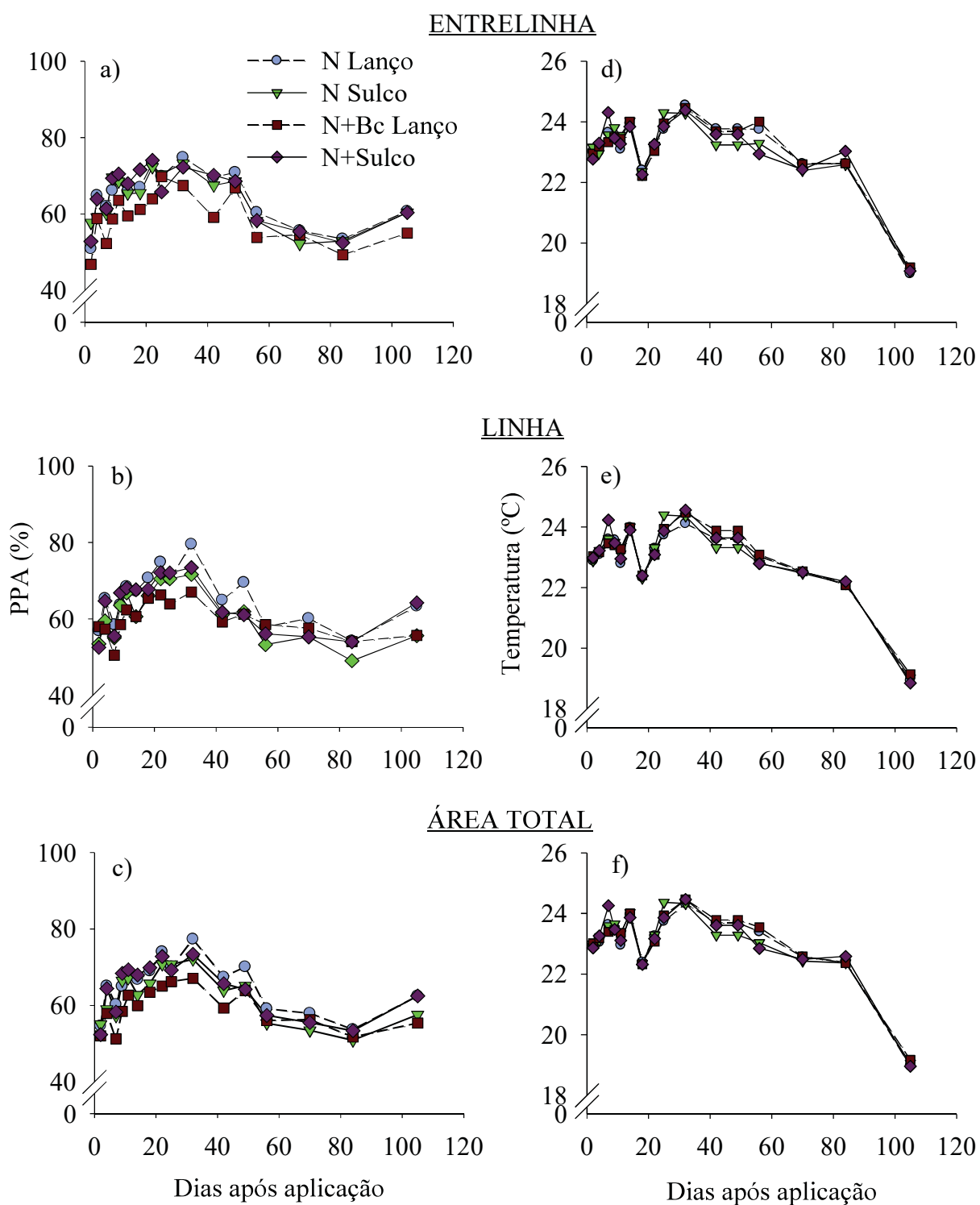


FIGURA 6. Porosidade preenchida por água (PPA) (a, b, c) e temperatura (d, e, f) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a; d) e linha (b; e) de plantio do milho e de área total (c, f). Os tratamentos constituem da aplicação de ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

Em contraste, na linha, os tratamentos com aplicação à lanço foram os que mais emitiram N_2O , uma vez que houve adição dos insumos nesta parte da área de plantio do milho (FIGURA 7b). O maior fluxo, que ocorreu aos 18 dias após aplicação, foi registrado no tratamento N+Bc Lanço ($660 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) seguido pelo N Lanço ($519 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), superiores aos observados para os mesmos tratamentos na entrelinha, 454 e $313 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Aos sete e nove dias após aplicação, o N Lanço foi significativamente superior aos demais tratamentos, contudo aos 31 dias após aplicação o tratamento que apresentou esse comportamento foi N Sulco.

Na área total, o comportamento foi semelhante ao da entrelinha, contudo o fluxo de N_2O variou de 542 a $17,2 \text{ N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ emitidos pelos tratamentos N Sulco e N+Bc Sulco, respectivamente (FIGURA 7c). Ainda, não se verificou a mesma diferença entre os métodos de aplicação e adição de biocarvão, no momento do pico de emissão, em comparação as avaliações feitas apenas na entrelinha e na linha.

A concentração de NH_4^+ foi maior nos primeiros 11 dias após aplicação, diminuindo após esse período, tanto para entrelinha, linha e área total (FIGURA 8). Em relação a área total, a concentração de NH_4^+ variou de 210 mg N kg^{-1} a $3,40 \text{ mg N kg}^{-1}$, sendo que o tratamento N Sulco foi estatisticamente maior aos sete e nove dias após aplicação (FIGURA 8c).

Os maiores valores de NH_4^+ foram verificados na entrelinha, nos tratamentos N+Bc Sulco (434 mg N kg^{-1}) N Sulco (170 mg N kg^{-1}), aos dois dias após aplicação (FIGURA 8a). Aos quatro dias após aplicação, o tratamento que recebeu simultaneamente nitrogênio e biocarvão apresentou uma concentração (173 mg N kg^{-1}) de NH_4^+ significativamente maior em comparação aos demais. Em contrapartida, aos sete dias após aplicação o N Sulco (153 mg N kg^{-1}) mostrou a maior concentração de NH_4^+ .

Na linha de plantio do milho, os tratamentos aplicados a lanço foram os que apresentaram um alto valor de concentração de NH_4^+ , sendo 106 mg N kg^{-1} pelo N Lanço e $76,6 \text{ mg N kg}^{-1}$ pelo N+Bc Sulco (FIGURA 8b). Após queda nas concentrações aos 11 dias após a aplicação, aos 18 ocorreu um aumento nestas concentrações, momento no qual o tratamento N Sulco apresentou a maior concentração ($19,5 \text{ mg N kg}^{-1}$) e N+Bc Lanço a menor ($8,95 \text{ mg N kg}^{-1}$).

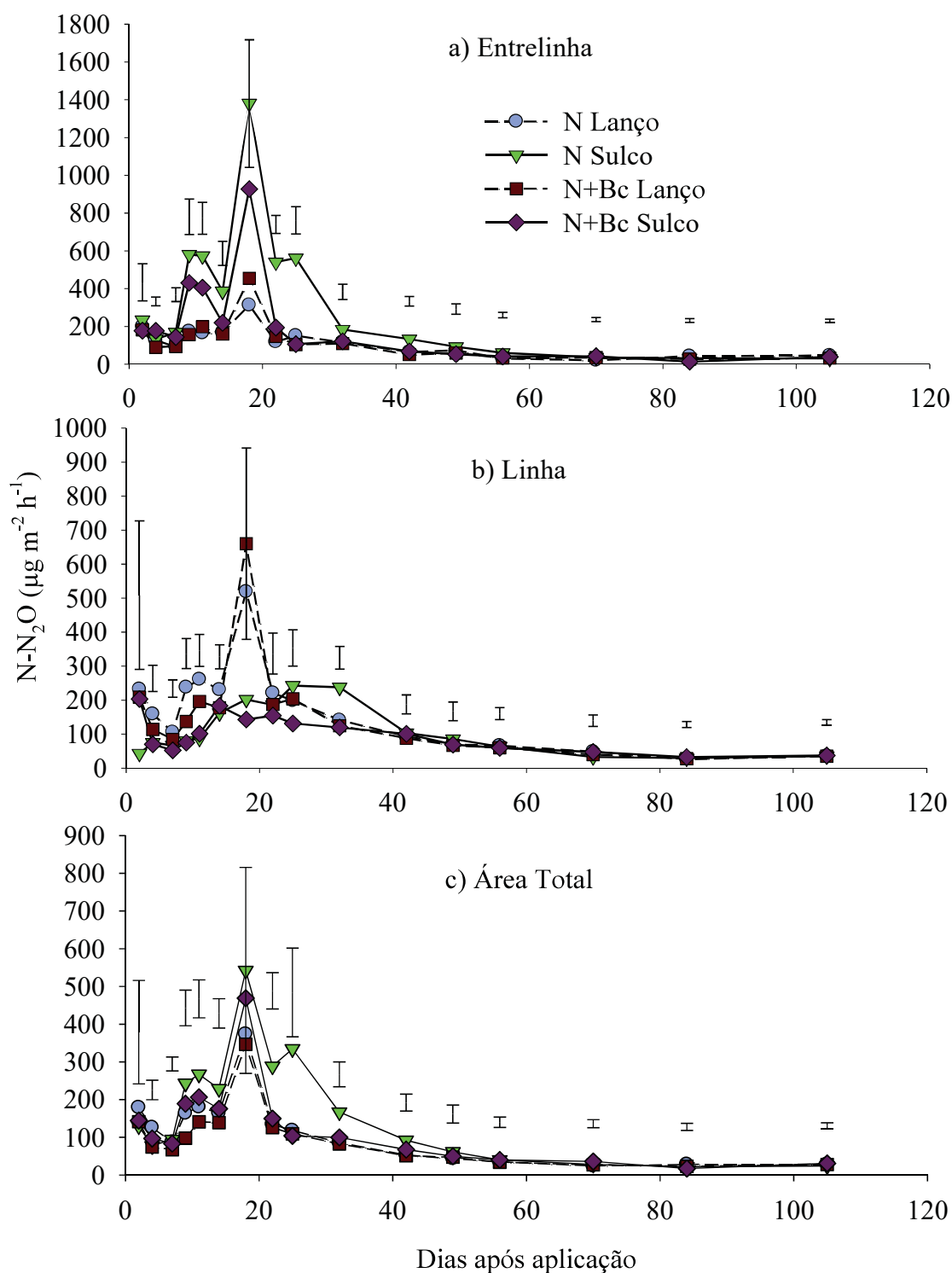


FIGURA 7. Fluxo de óxido nitroso (N_2O) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a) e linha (b) de plantio do milho e de área total (c). Os tratamentos constituem da aplicação de ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Barras verticais representam a diferença mínima significativa. Pinhais-PR, 2016.

Inicialmente, as concentrações de NO_3^- foram baixas para todos os tratamentos, contudo apresentando um grande aumento quatro dias após aplicação (FIGURA 9). Em área total, aos quatro, sete e 11 dias após aplicação os tratamentos a lanço apresentaram as maiores concentrações enquanto que aos 22, 25 e 42 os tratamentos no sulco foram os que demonstraram esse efeito (FIGURA 9c). As variações nas concentrações de NO_3^- no sistema ficaram entre $16,5 \text{ mg N kg}^{-1}$ e $1,80 \text{ mg N kg}^{-1}$.

Apenas aos 22, 25 e 42 dias após aplicação verificou-se diferença significativa na entrelinha de plantio, quando o tratamento N Sulco apresentou as maiores concentrações de NO_3^- , sendo 4,54; 7,25 e $10,9 \text{ mg N kg}^{-1}$, respectivamente (FIGURA 9a). De maneira geral, todos os tratamentos apresentaram o mesmo comportamento ao longo de todo o período avaliado.

Os tratamentos aplicados no sulco apresentaram uma baixa variação sazonal de NO_3^- na linha de plantio do milho, ficando entre $1,80$ e $8,93 \text{ mg N kg}^{-1}$ (FIGURA 9b). Aos 9 e 11 dias após aplicação, o N Lanço e N+Bc Lanço tiveram as maiores concentrações, contudo foram estatisticamente semelhantes entre si. Ainda assim, esses tratamentos tiveram um abrupto incremento aos quatro dias após aplicação, $15,1 \text{ mg N kg}^{-1}$ pelo N+Bc Lanço e $12,4 \text{ mg N kg}^{-1}$ pelo N+Lanço, o qual foi diminuindo gradativamente até os 14 dias.

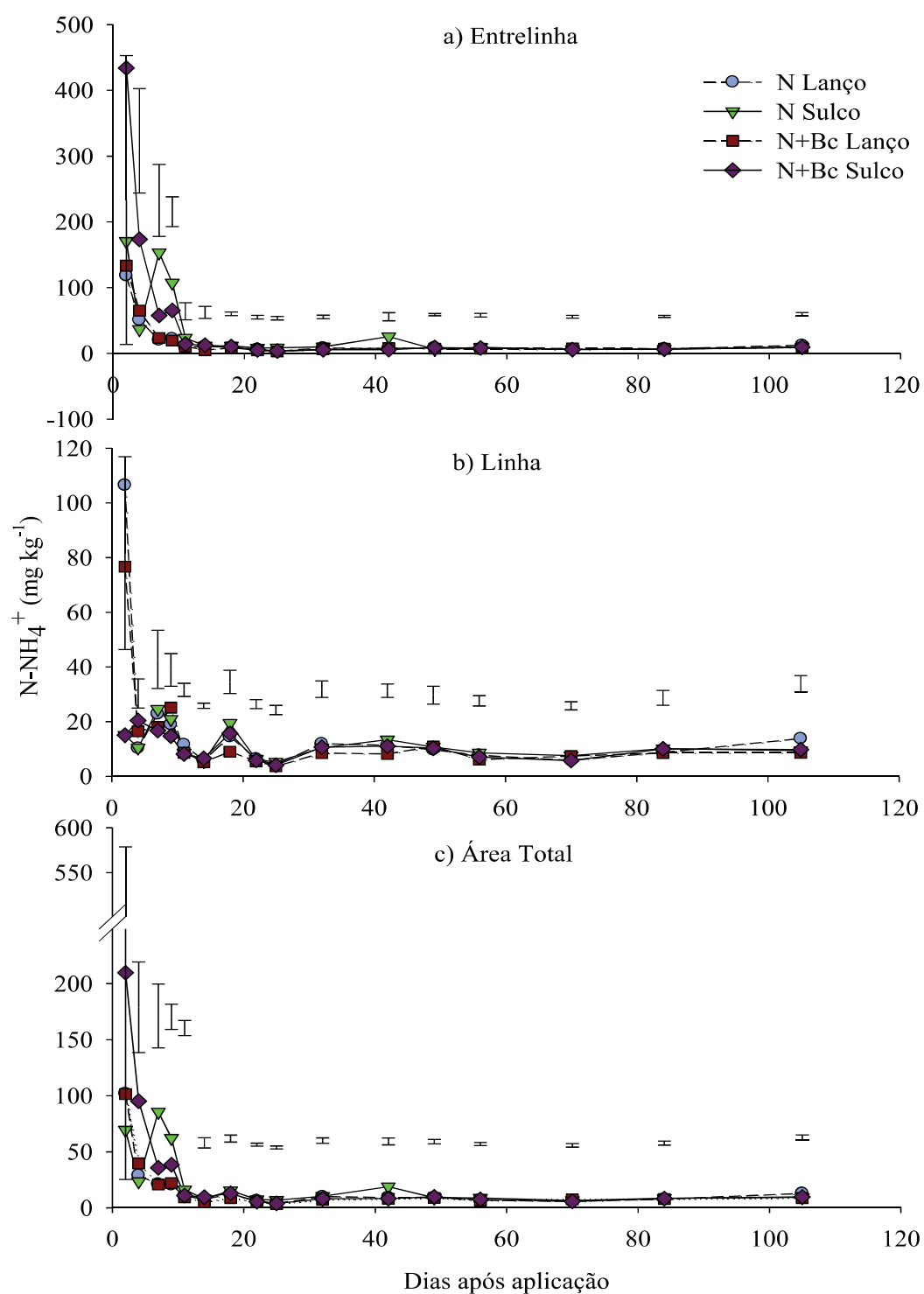


FIGURA 8. Concentração de amônio (NH_4^+) no solo (0-5 cm) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a) e linha (b) de plantio do milho e de área total (c). Os tratamentos constituem da aplicação e ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanco (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

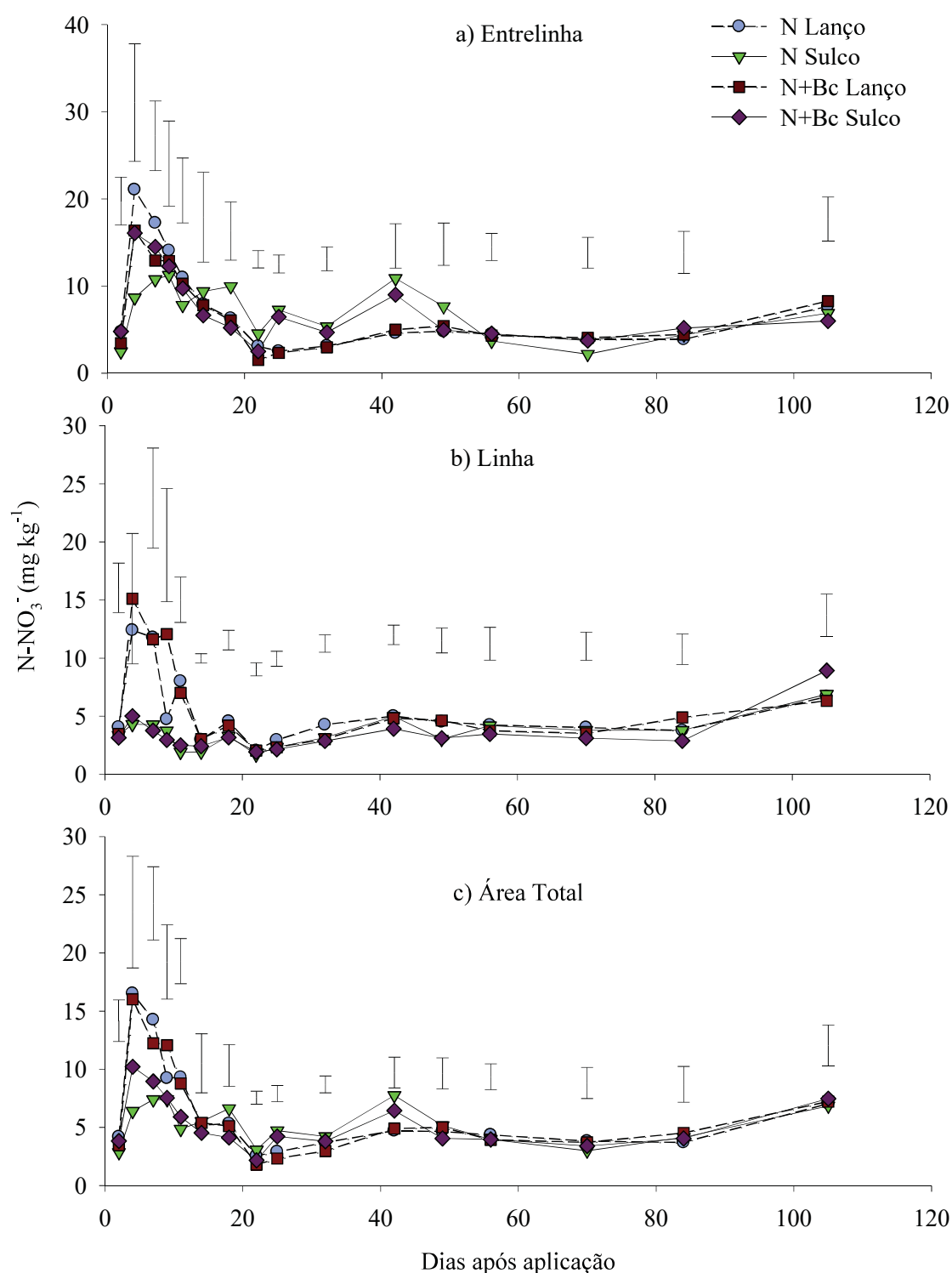


FIGURA 9. Concentração de nitrato (NO_3^-) no solo (0-5 cm) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a) e linha (b) de plantio do milho e de área total (c). Os tratamentos constituem da aplicação e ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanco (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

A análise de regressão simples demonstrou relação entre os fluxos de N_2O e a PPA do solo para a entrelinha ($p < 0,0001$), a linha ($p = 0,0003$) e em área total ($p = 0,0002$) (FIGURA 10a,b,c). Com base nisso, pôde-se verificar que para cada 1 % de aumento na PPA há um incremento de 11,2 na entrelinha, 7,23 na linha e 7,37 $\mu g N m^{-2} h^{-1}$ em área total no fluxo de N_2O . Diferentemente, a temperatura do solo não influenciou a emissão de N_2O (FIGURA 10d,f,g). Sob mesma análise, entre as concentrações de N inorgânico no solo, apenas o NH_4^+ na entrelinha se relacionou diretamente com o fluxo de N_2O ($p = 0,0564$) (FIGURA 11).

A avaliação da influência conjunta das variáveis do solo sob a emissão de N_2O foi realizada por meio de regressão linear múltipla (EQ. 5,6, 7). As concentrações de NH_4^+ e NO_3^- , a porosidade preenchida por água e a temperatura, juntas, atuaram significativamente no fluxo de N_2O a partir do solo na entrelinha (EQ. 5), linha de plantio (EQ. 6) e em área total (EQ. 7). De forma isolada, apenas a PPA apresentou influência na linha ($p = 0,0033$) e na entrelinha ($p = 0,0003$). Em área total, verificou-se interferência significativa da concentração de NH_4^+ ($p = 0,0472$) e da PPA ($p = 0,0008$). Para todas as equações de regressão múltipla obtidas, a PPA resultou nos maiores incrementos de N- N_2O na adição de uma unidade desta variável, sendo-os de 0,41 na linha, 0,47 na linha e 0,54 $\mu g N m^{-2} h^{-1}$ em área total.

$$\begin{aligned} \text{Fluxo N-}N_2O_{\text{Entrelinha}} &= (0,15 * N-NH_4^+) + (0,10 * N-NO_3^-) + (0,41 * PPA) + (-0,08 * T) - 331,14 \\ p &= 0,0346 \quad R^2 = 0,16 \quad N = 64 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Fluxo N-}N_2O_{\text{Linha}} &= (0,21 * N-NH_4^+) + (0,03 * N-NO_3^-) + (0,47 * PPA) + (-0,07 * T) - 521,49 \\ p &= 0,0446 \quad R^2 = 0,25 \quad N = 64 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Fluxo N-}N_2O_{\text{Área Total}} &= (0,24 * N-NH_4^+) + (0,01 * N-NO_3^-) + (0,54 * PPA) + (-0,04 * T) - 362,60 \\ p &= 0,00151 \quad R^2 = 0,25 \quad N = 64 \end{aligned} \quad (7)$$

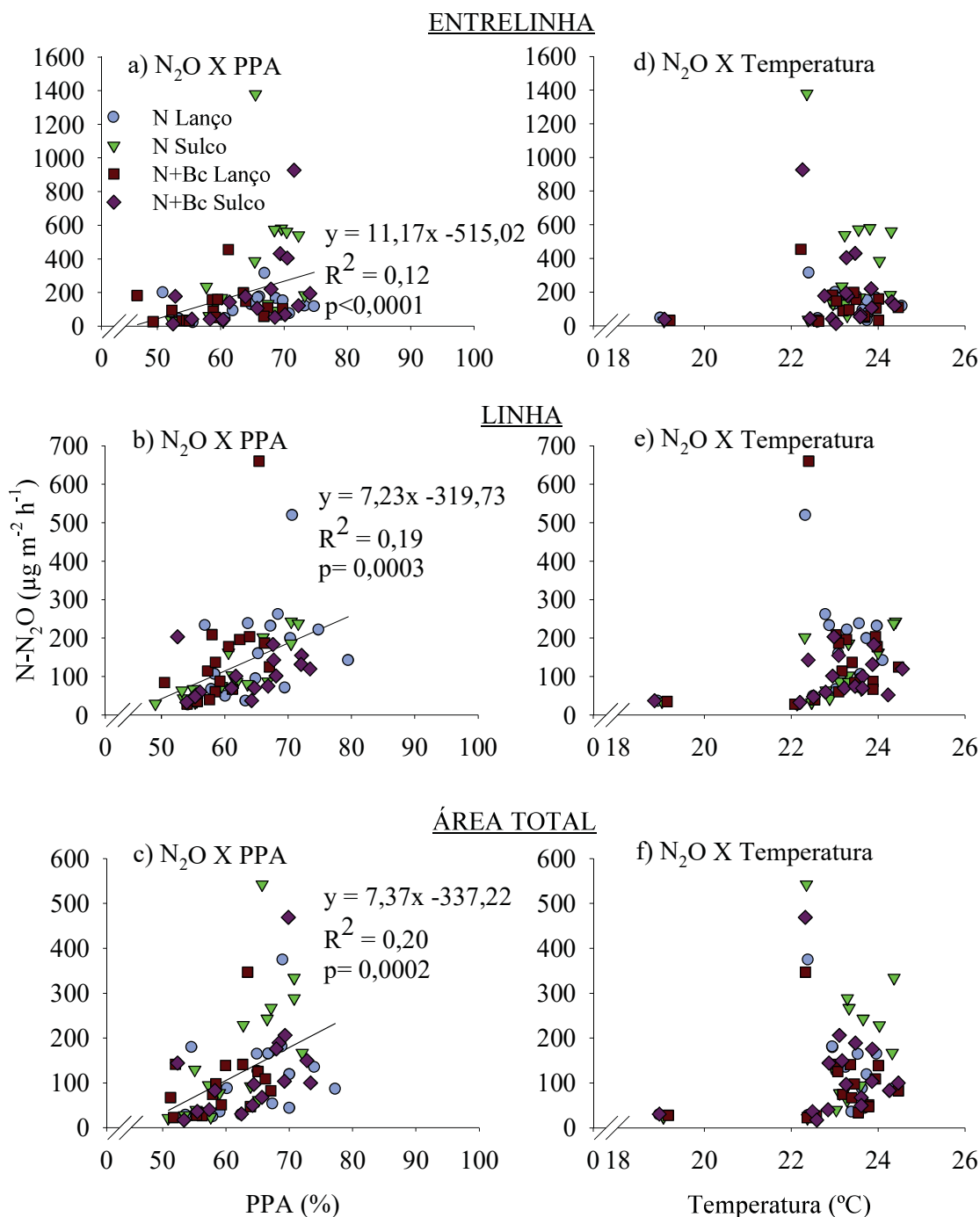


FIGURA 10. Relação entre a emissão de óxido nitroso (N₂O) e a porosidade preenchida por água (PPA) (a, b, c) e a temperatura (d, e, f) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a, d) e linha (b, e) de plantio do milho e em área total (c, f). Os tratamentos constituem da aplicação de ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanco (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

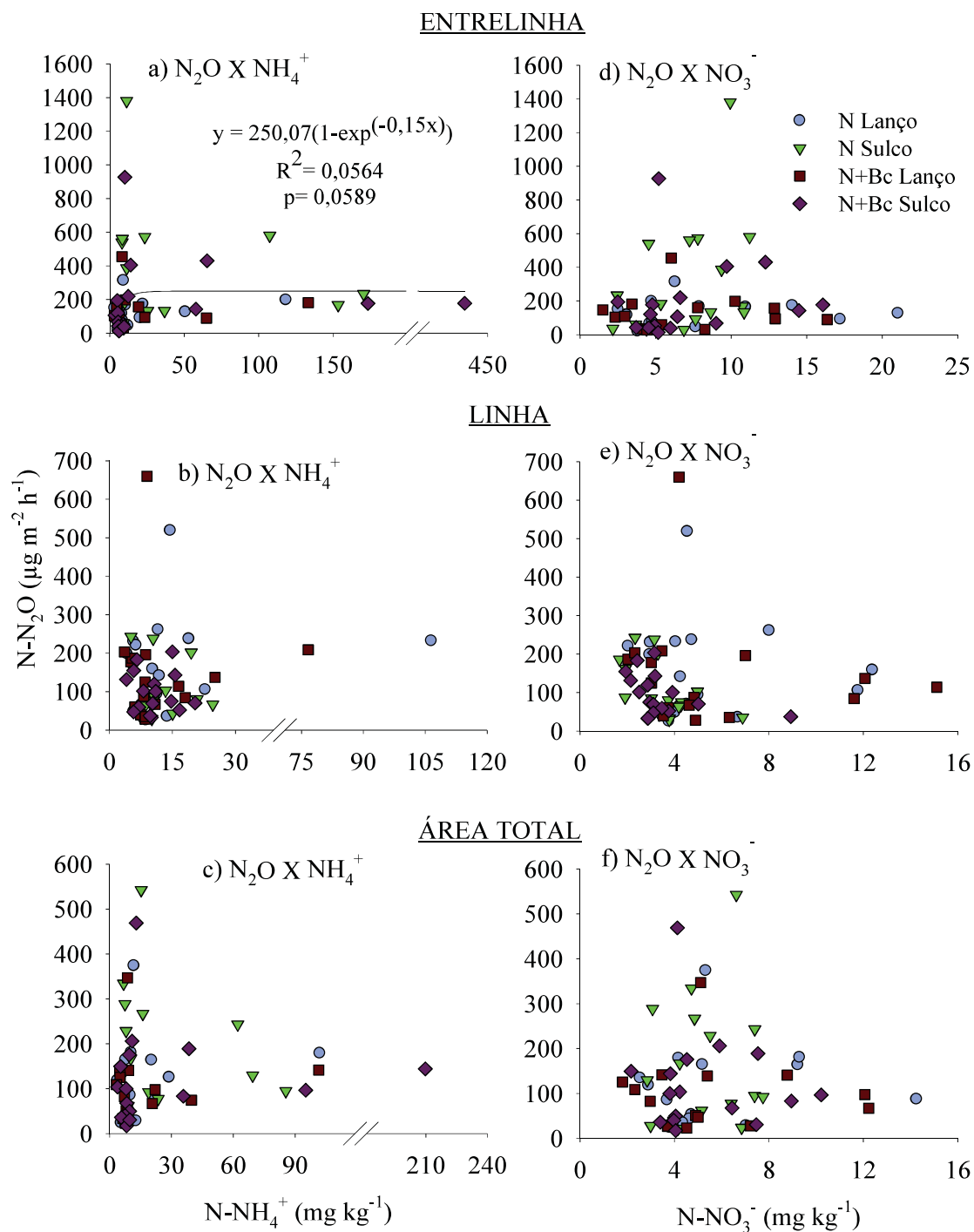


FIGURA 11. Relação entre a emissão de óxido nitroso (N_2O) e a concentração de amônio (NH_4^+) (a, b, c) e a concentração de nitrato (NO_3^-) (d, e, f) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura da entrelinha (a, d) e linha (b, e) de plantio do milho e em área total (c, f). Os tratamentos constituem da aplicação de ureia à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e de ureia em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

A emissão acumulada de N_2O após a aplicação dos tratamentos até o fim da cultura do milho foi maior com o nitrogênio aplicado no sulco (450 mg N m^{-2}), não ocorrendo diferença estatística entre os demais tratamentos (TABELA 4) na entrelinha. Em relação a linha de plantio, as emissões acumuladas de N_2O foram semelhantes, variando de 194 a 267 mg N m^{-2} , pelos tratamentos N+Bc Sulco e N Lanço, respectivamente. Referindo-se a área total, novamente o tratamento de N Sulco ($3,4 \text{ kg N ha}^{-1}$) foi superior na emissão de N_2O , onde o menor valor foi verificado no tratamento N+Bc Lanço ($2,2 \text{ kg N ha}^{-1}$). Quanto levado em consideração as emissões de N_2O em $\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$, esses valores correspondem a 1676,8 (N Sulco) e 1057,5 (N+Bc Lanço).

A emissão acumulada de N_2O , comparando a entrelinha com linha de plantio, diferiu estatisticamente em todos os tratamentos (TABELA 4). A aplicação no sulco foi responsável pelo maior fluxo do gás na entrelinha ($450,2$ e $288,2 \text{ mg N m}^{-2}$), enquanto que este comportamento foi desempenhado pela aplicação à lanço na linha de plantio do milho ($267,3$ e $246,6 \text{ mg N m}^{-2}$).

TABELA 4. Emissão acumulada de óxido nitroso (N_2O) na entrelinha e linha de plantio do milho e em área total para nitrogênio aplicado à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

	Entrelinha	Linha	Área Total*	
-----Emissão acumulada de N-N ₂ O em 103 dias-----				
	(mg m ⁻²)		(kg ha ⁻¹)	(kg CO ₂ eq ha ⁻¹)
N Lanço	202,5 b B	267,3 a A	2,3 b	1144,4b
N Sulco	450,2 a A	238,2 a B	3,4 a	1676,8a
N+Bc Lanço	187,5 b B	246,6 a A	2,2 b	1057,5b
N+Bc Sulco	288,2 b A	194,0 a B	2,4 b	1174,3b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre os tratamentos e médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre linha e entrelinha de plantio pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). *Os valores de área total correspondem a média da entrelinha e linha e transformados para quantidade de N- N_2O e N_2O em CO_2eq emitido por hectare.

A quantidade de N mineral que esteve presente no sistema durante o período avaliado é representada pelas intensidades de NH_4^+ e NO_3^- (TABELA 5). Na entrelinha de plantio, as intensidades de NH_4^+ foram maiores nos tratamentos N Sulco ($1,81 \text{ g N kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e N+Bc Sulco

(1,83 g N kg⁻¹ d⁻¹), demonstrando efeito apenas do método de aplicação. Os mesmos resultados foram observados em área total, com o valor de 1,39 g N kg⁻¹ d⁻¹ tanto no tratamento N como no N+Bc Sulco. Contudo os valores de NH₄⁺ foram significativamente semelhantes na linha de plantio, com uma variação de 0,15 g N kg⁻¹ d⁻¹ nas suas intensidades. A maior intensidade de NO₃⁻ registrada foi de 0,62 g N kg⁻¹ d⁻¹ enquanto a menor foi de 0,38 g N kg⁻¹ d⁻¹, não apresentando diferença significativa entre os tratamentos na entrelinha e linha de plantio e em área total.

TABELA 5. Intensidade de amônio (NH₄⁺) e de nitrato (NO₃⁻) do solo na entrelinha e linha de plantio do milho e em área total para nitrogênio aplicado à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

Tratamento	Entrelinha	Linha	Área Total
-----Intensidade de N-NH ₄ ⁺ em 103 dias (g N kg ⁻¹ d ⁻¹)-----			
N Lanço	1,06 b A	1,10 a A	1,05 b
N Sulco	1,81 a A	1,06 a B	1,39 a
N+Bc Lanço	1,07 b A	0,95 a A	1,00 b
N+Bc Sulco	1,83 a A	0,95 a B	1,39 a
-----Intensidade de N-NO ₃ ⁻ em 103 dias (g N kg ⁻¹ d ⁻¹)-----			
N Lanço	0,58 a A	0,49 a B	0,53 a
N Sulco	0,61 a A	0,49 a B	0,51 a
N+Bc Lanço	0,57 a A	0,50 a A	0,53 a
N+Bc Sulco	0,62 a A	0,38 a B	0,50 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre os tratamentos e médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre linha e entrelinha de plantio pelo Teste Tukey (p < 0,05).

Em avaliação da dependência da quantidade de N₂O emitido após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura com os atributos do solo, constatou-se correlação positiva da emissão acumulada de N₂O com a intensidade de NH₄⁺ na entrelinha e em área total, e com a intensidade de NO₃⁻ na linha (TABELA 6).

TABELA 6. Correlação simples entre a emissão acumulada de óxido nitroso (N_2O) na entrelinha e linha de plantio do milho e em área total e a intensidade de amônio (NH_4^+) e de nitrato (NO_3^-) e porosidade preenchida por água (PPA) e a temperatura médias do solo. Pinhais-PR, 2016.

N_2O /Variável	NH_4^+	NO_3^-	PPA	Temperatura
Entrelinha	0,68*	0,05ns	0,32ns	-0,08ns
Linha	0,27ns	0,54*	0,10ns	0,17ns
Área Total	0,53*	0,10ns	0,12ns	-0,01ns

* Coeficiente de correlação (r) com $p < 0,05$. ^{NS} Não significativo.

Quando considerada a quantidade de N que foi perdido na forma de N_2O , o tratamento N Sulco foi que apresentou a maior perda (2,17 %) enquanto que o N+Bc Lanço foi que apresentou a menor (0,64 %) na entrelinha de plantio (TABELA 7). Na linha houve uma variação de 0,43 %, contudo não se verificou efeito significativo dos tratamentos. Em área total, o tratamento N Sulco perdeu 0,60 kg N- N_2O ha^{-1} a mais que o tratamento N+Bc Lanço para cada 100 kg N-ureia aplicado no solo.

Tabela 7. Fator de emissão da entrelinha e linha de plantio do milho e área total para nitrogênio aplicado à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

	Entrelinha	Linha	Área Total
-----Fator de emissão de N- N_2O em 103 dias (%)-----			
N Lanço	0,73b	1,06a	0,90b
N Sulco	2,17a	0,89a	1,53a
N+Bc Lanço	0,64b	0,94a	0,79b
N+Bc Sulco	1,23b	0,63a	0,93b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre os tratamentos e pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3. EMISSÃO DE N_2O AFETADA POR DOSES DE BIOCARVÃO EM LAVOURA DE AVEIA PRETA

3.1. Pré-tratamentos

O fluxo de N_2O , no período pós plantio da aveia preta (FIGURA 3) variou de 67,3 a 10,7 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (FIGURA 12a), resultando em uma emissão acumulada de 718,86 g N ha^{-1} (FIGURA 12b).

As concentrações de NH_4^+ (18,3 mg N kg^{-1}) e de NO_3^- (5,85 mg N kg^{-1}) foram maiores aos zero e cinco dias após o plantio, respectivamente (FIGURA 12a). Esses valores apresentaram uma queda aos 44 dias após o plantio, chegando a 9,87 mg N kg^{-1} e 3,24 mg N kg^{-1} . A fim desse período, 524 $\text{mg N kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ e 184 $\text{mg N kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ passaram pelo sistema avaliado, representados pela intensidade de NH_4^+ e NO_3^- na FIGURA 12b.

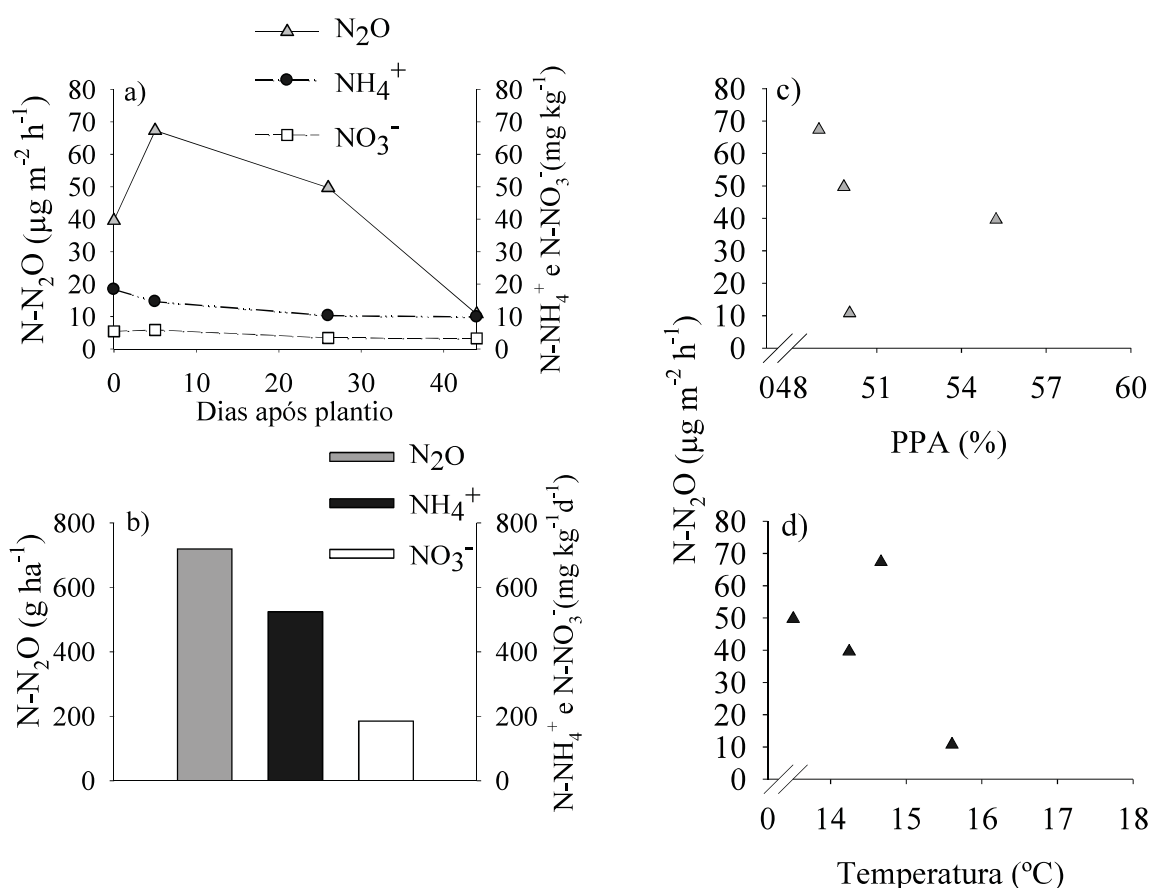


FIGURA 12. Fluxo de óxido nitroso (N_2O) e concentração de amônio (NH_4^+) e de nitrato (NO_3^-) (a), emissão acumulada de N_2O e intensidade de NH_4^+ e de NO_3^- (b), relação entre fluxo de N_2O e a porosidade preenchida por água (PPA) (c) e temperatura do solo (d) após o plantio da aveia preta. Pinhais-PR, 2015.

As variáveis sazonais, porosidade preenchida por água e temperatura do solo, não se relacionaram com o fluxo de N_2O (FIGURA 12c;d). Os valores de PPA observados ficaram entre 55 e 49 % (FIGURA 12c). Por sua vez, a temperatura do solo atingiu seu ápice com 15,6 °C, e apresentou uma variação de 2,1 °C ao longo dos 44 dias após o plantio (FIGURA 12d).

3.3.2. Pós aplicação do biocarvão

A porosidade preenchida por água e a temperatura do solo não foram afetadas pela aplicação de biocarvão no solo (FIGURA 13). Aos 17 dias após a aplicação dos tratamentos observou-se a maior PPA, 66 %, onde aplicou-se 10 Mg Bc ha⁻¹ e aos 38 dias a menor PPA, 37 %, com a dose de 2 Mg Bc ha⁻¹ (FIGURA 13a). Já a temperatura do solo foi maior aos 31 dias após aplicação (18,4 °C), sendo 12,7 °C o menor valor registrado aos 7 dias após aplicação, ambas pelo tratamento com 10 Mg Bc ha⁻¹(FIGURA 13b).

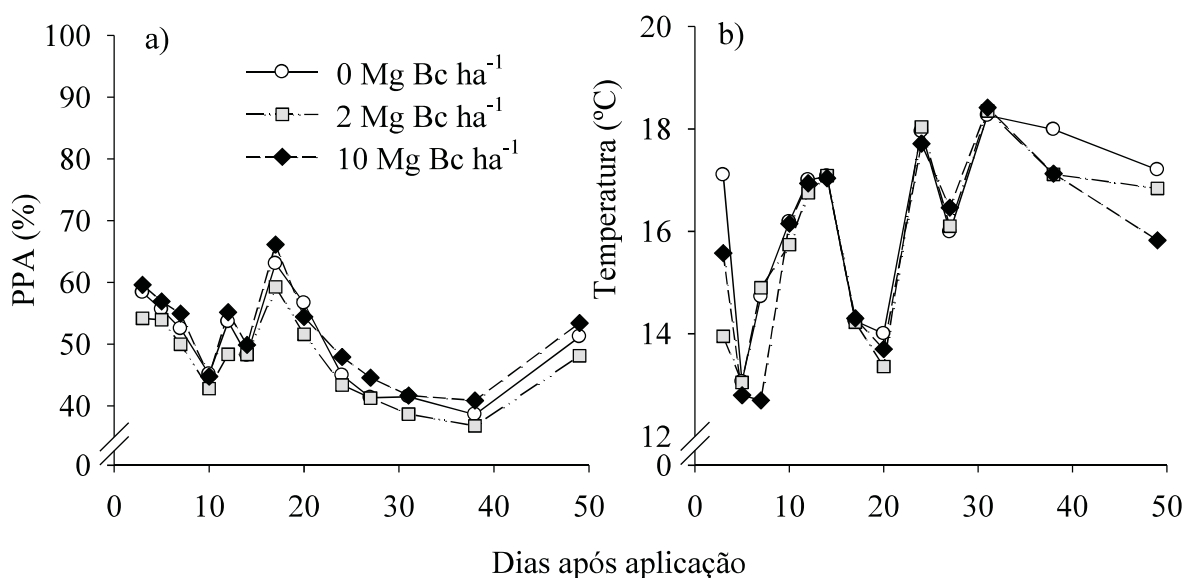


FIGURA 13. Porosidade preenchida por água (PPA) (a) e temperatura (B) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura. Os tratamentos constituem da aplicação das doses de biocarvão (Bc): 0 Mg Bc ha⁻¹, 2 Mg Bc ha⁻¹ e 10 Mg Bc ha⁻¹. Pinhais-PR, 2016.

O fluxo de N_2O foi estatisticamente semelhante para as três doses de biocarvão, apresentando uma queda aos cinco dias após a aplicação dos tratamentos (FIGURA 14). O pico de emissão foi registrado aos três dias após aplicação, sendo a maior taxa de emissão do gás

de $119 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ pelo tratamento com 2 Mg Bc ha^{-1} . Em contrapartida, aos 14 dias após aplicação houve um consumo de $0,52 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ de N_2O na presença de 10 Mg Bc ha^{-1} .

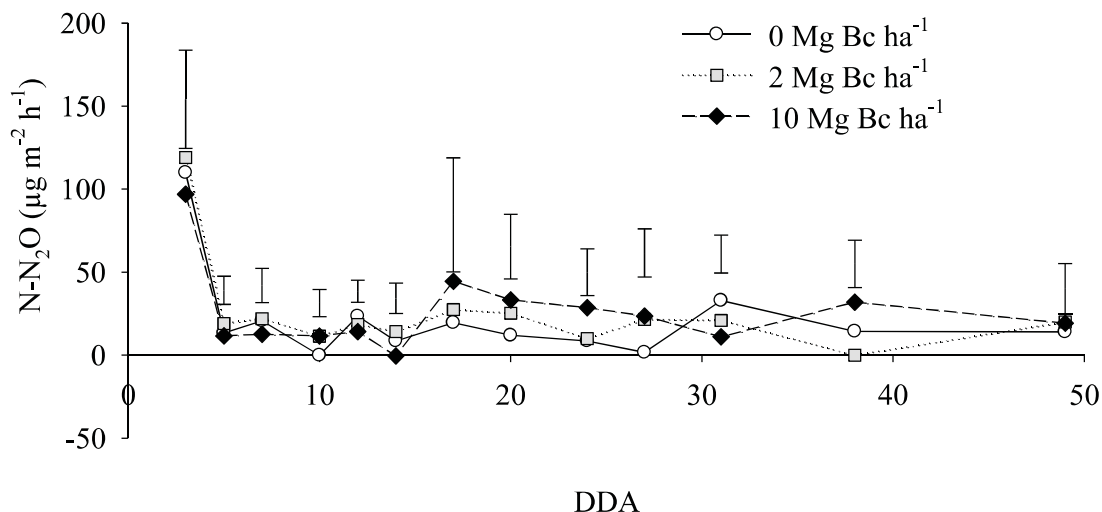


FIGURA 14. Fluxo de óxido nitroso (N_2O) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura. Os tratamentos constituem da aplicação das doses de biocarvão: 0 Mg Bc ha^{-1} , 2 Mg Bc ha^{-1} e 10 Mg Bc ha^{-1} . Barras verticais representam a diferença mínima significativa. Pinhais-PR, 2016.

O comportamento das concentrações de NH_4^+ ao longo do período avaliado foi semelhante ao observado no fluxo de N_2O (FIGURA 15). O maior valor NH_4^+ foi observado aos três dias após aplicação pelo tratamento com 2 Mg Bc ha^{-1} (FIGURA 15a). Contudo, a menor concentração de NH_4^+ foi de $0,88 \text{ mg N kg}^{-1}$ pelo mesmo tratamento. Em relação a concentração de NO_3^- no solo, aos sete dias após aplicação foi quando se registrou o maior valor ($15,33 \text{ mg N kg}^{-1}$) (FIGURA 15b). Após redução nas concentrações de NH_4^+ e NO_3^- aos dez dias após aplicação, houve um aumento aos 12 dias após aplicação, sendo a maior concentração de $23,31$ para o NH_4^+ e $11,22 \text{ mg N kg}^{-1}$ para o NO_3^- , no tratamento com 10 Mg Bc ha^{-1} . Este tratamento apresentou a menor concentração de NO_3^- ($0,65 \text{ mg N kg}^{-1}$) aos 31 dias após aplicação.

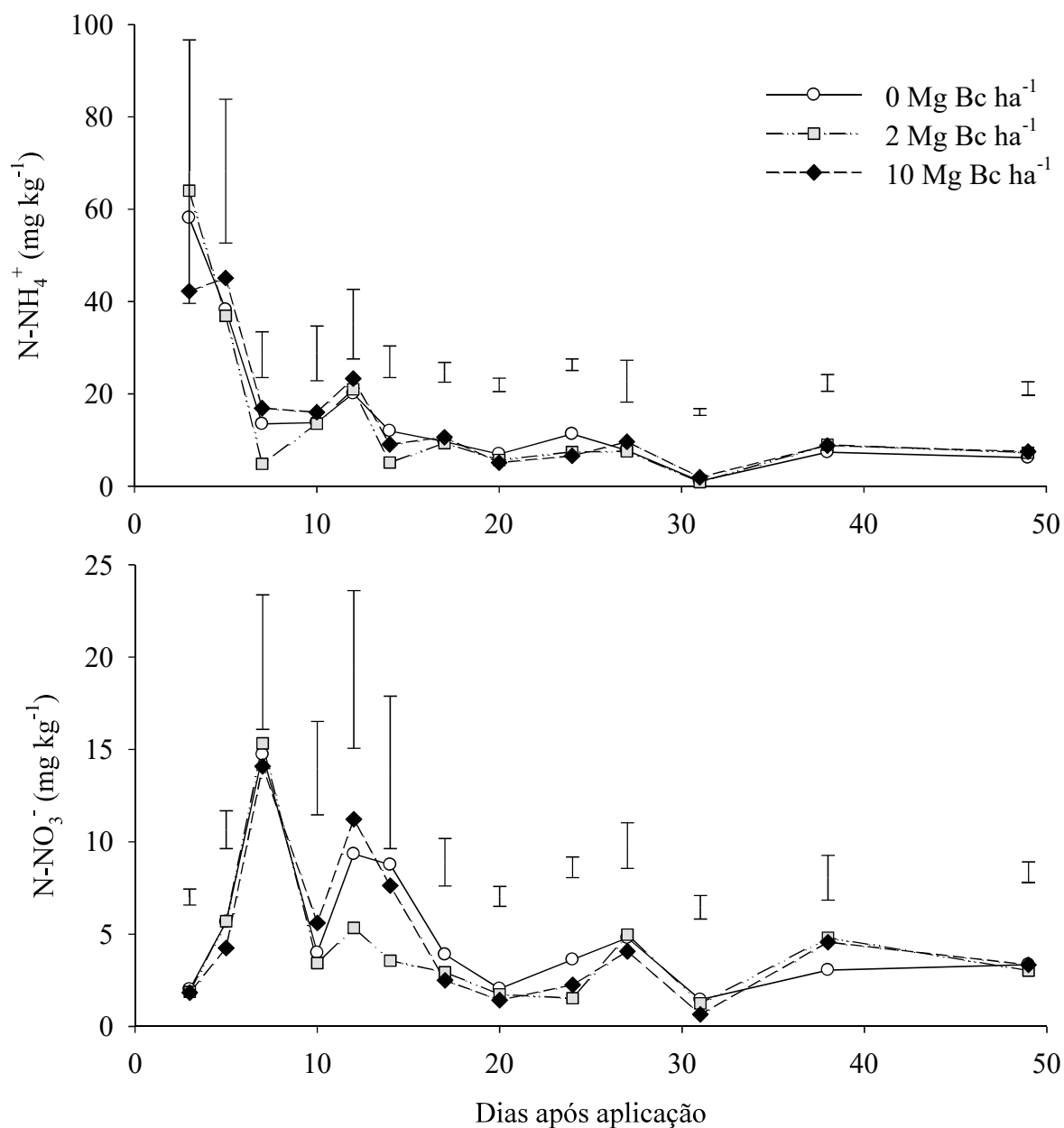


FIGURA 15. Concentração de amônio (NH_4^+) e de nitrato (NO_3^-) no solo (0-5 cm) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura. Os tratamentos constituem da aplicação das doses de biocarvão: 0 Mg Bc ha^{-1} , 2 Mg Bc ha^{-1} e 10 Mg Bc ha^{-1} . Pinhais-PR, 2016.

A relação individual das variáveis do solo na emissão de N_2O foi obtida por meio da análise de regressão simples (FIGURA 16). A porosidade preenchida por água ($p=0,0114$) e a concentração de NH_4^+ ($p<0,0001$) e NO_3^- ($p=0,0348$) mostraram relação com fluxo do gás. Para cada unidade acrescida de PPA (%) e concentração de NH_4^+ ($\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) tem como resultado 1,48 e 1,19 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de aumento na emissão de N_2O , respectivamente (FIGURA 1 a,c). Por

sua vez, temperatura do solo e a concentração de NO_3^- não influenciaram na emissão (FIGURA 16b,d).

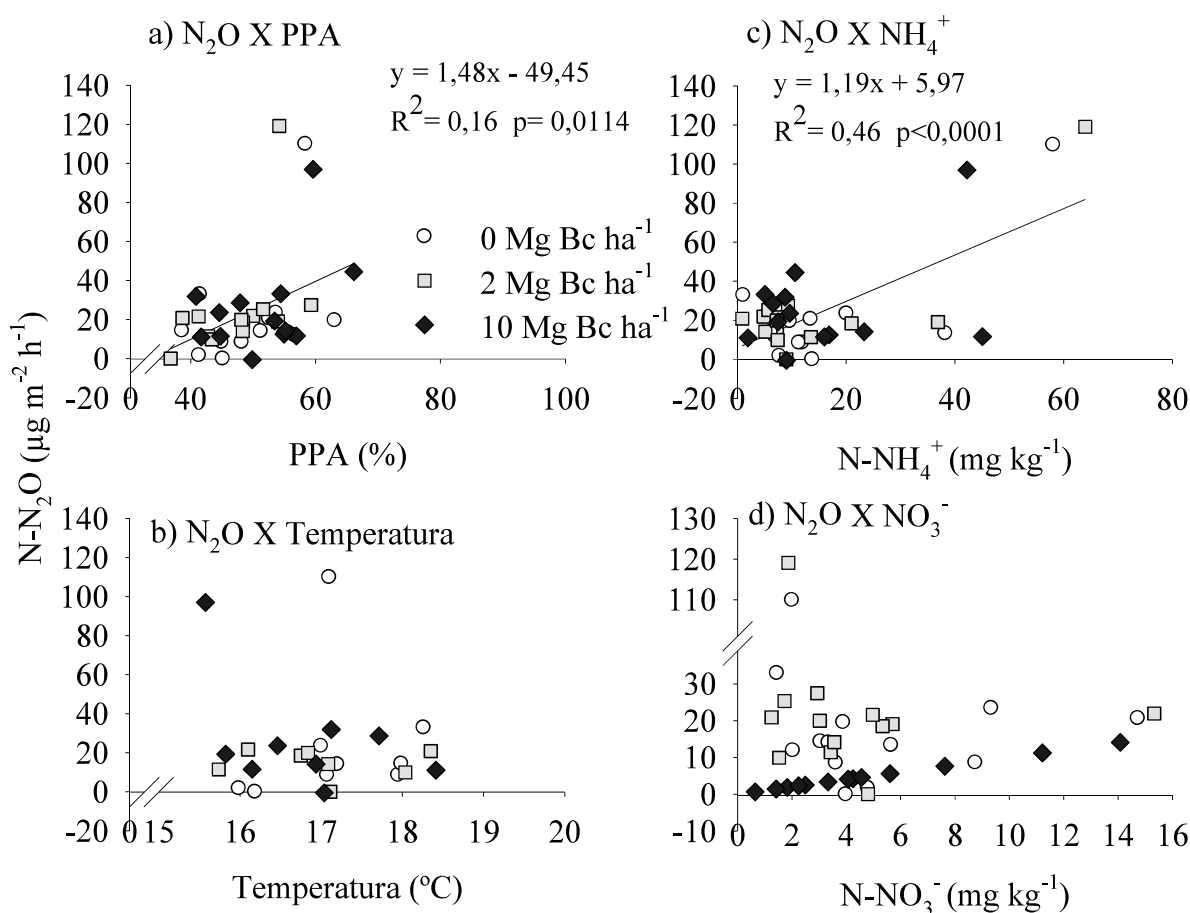


FIGURA 16. Relação entre o fluxo de óxido nitroso (N_2O) e a porosidade preenchida por água (PPA) (a), a temperatura (b), a concentração de amônio (NH_4^+) (c) e a de nitrato (NO_3^-) (d) após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura. Os tratamentos constituem da aplicação das doses de biocarvão: 0 Mg Bc ha^{-1} , 2 Mg Bc ha^{-1} e 10 Mg Bc ha^{-1} . Pinhais-PR, 2016.

A influência combinada da concentração de NH_4^+ e de NO_3^- , da porosidade preenchida por água e da temperatura do solo no fluxo de N_2O está representa na EQ. 8, a qual foi determinada por análise de regressão linear múltipla. A partir disso, verificou-se uma forte relação entre essas variáveis ($p < 0,0001$), dado que a maior influência foi por parte da concentração de NH_4^+ , seguida pela PPA, temperatura do solo e concentração de NO_3^- . Individualmente, apenas a temperatura do solo não se relacionou com a emissão de N_2O ($p = 0,0857$).

$$\text{Fluxo N-N}_2\text{O} = (0,64 * \text{N-NH}_4^+) + (0,24 * \text{N-NO}_3^-) + (0,31 * \text{PPA}) + (-0,26 * \text{T}) - 106,83$$

$$p < 0,0001 \quad R^2 = 0,59 \quad N = 39 \quad (8)$$

Tabela 8. Emissão acumulada de óxido nitroso (N₂O) em 49 dias e fator de emissão (FE), intensidade de amônio (NH₄⁺) e de nitrato (NO₃⁻) do solo após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura para as doses de biocarvão: 0 Mg Bc ha⁻¹, 2 Mg Bc ha⁻¹ e 10 Mg Bc ha⁻¹. Pinhais-PR, 2016.

	Emissão acumulada de N ₂ O		FE	Intensidade	
	(g N ha ⁻¹)	(kg CO ₂ eq ha ⁻¹)		(mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹ d ⁻¹)	(mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹ d ⁻¹)
0 Mg	255,65a	124,54a	0,07a	458,54a	184,84a
2 Mg	205,58a	100,15a	0,03a	431,81a	168,41a
10 Mg	237,85a	115,87a	0,06a	488,47a	182,74a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre os tratamentos pelo Teste de Tukey (p < 0,05).

A emissão acumulada de N₂O e a intensidade de NH₄⁺ e de NO₃⁻ não diferiram significativamente com a aplicação de biocarvão no solo (TABELA 8). A maior quantidade de N₂O emitido no período após aplicação da adubação nitrogenada de cobertura, foi observada no tratamento sem aplicação de biocarvão, 256 g N ha⁻¹, e a menor quantidade sob influência de 2 Mg Bc ha⁻¹, 206 g N ha⁻¹. A diferença entre o maior (0 Mg Bc ha⁻¹) e o menor (2 Mg Bc ha⁻¹) valor de emissão acumulada de N₂O em CO₂eq foi de 24,4 kg ha⁻¹. Da mesma forma, o fator de emissão também não sofreu influência dos tratamentos, sendo que a maior perda de N foi de 0,07 % pelo tratamento 0 Mg Bc ha⁻¹. Enquanto isso, a intensidade de NH₄⁺ variou de 432 a 488 mg N kg⁻¹ d⁻¹, sendo os tratamentos 0 e 10 Mg Bc ha⁻¹, respectivamente. Em avaliação da relação entre as variáveis que representam o todo o período de avaliação, observou uma correlação significativa de 0,56 entre a intensidade de NH₄⁺ e a de NO₃⁻ (TABELA 9).

TABELA 9. Matriz de correlação simples entre a emissão acumulada de óxido nitroso (N_2O), a intensidade de amônio (NH_4^+) e de nitrato (NO_3^-), porosidade preenchida por água (PPA) e a temperatura médias do solo. Pinhais-PR, 2016.

Variável	N_2O	NH_4^+	NO_3^-	PPA	Temperatura
N_2O	1,00	0,21ns	0,24ns	0,34ns	0,35ns
NH_4^+	-	1,00	0,56*	0,08ns	0,08ns
NO_3^-	-	-	1,00	0,37ns	0,13ns
PPA	-	-	-	1,00	0,24ns
Temp.	-	-	-	-	1,00

* Coeficiente de correlação (r) com $p < 0,05$. ^{NS} Não significativo.

4. DISCUSSÃO

4.1. EMISSÃO DE N_2O APÓS O PLANTIO AFETADA PELA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE BASE

Os picos de emissão de N_2O observados aos dez e cinco dias após o plantio das culturas do milho e da aveia preta, respectivamente, ocorreram em consequência da hidrólise da ureia aplicada na adubação nitrogenada de base. A consequente liberação de NH_4^+ forneceu substrato para reações de nitrificação e desnitrificação, responsáveis pela produção de N_2O . Esse efeito da fertilização foi observado em diversos estudos, nos quais variou de dias a seis semanas após aplicação do N no solo (Baggs et al., 2003; Jantalia et al., 2008; Zanatta et al., 2010; Brevilieri, 2016).

No experimento com milho, na linha de plantio, os baixos valores de NH_4^+ e NO_3^- no momento do pico de emissão de N_2O e a direta relação com a PPA, indicam que a emissão ocorreu principalmente por meio da desnitrificação. Em concordância, entre os três e dez dias após o plantio, a queda de ambos valores de NH_4^+ e NO_3^- , demonstram que parte do N mineral presente no solo foi nitrificado e prontamente desnitrificado durante este período (Gregorich et al., 2015). Na entrelinha de plantio, o fluxo de N_2O e as concentrações de N minerais encontrados resultaram da mineralização dos resíduos da cultura anterior (Gomes et al., 2009), uma vez que não houve fertilização de base nesta parte da área de plantio. Ainda a falta da aplicação de N na entrelinha de plantio resultou em uma emissão acumulada de N_2O 36 % menor do que a registrada na linha de plantio. Em conjunto, a menor temperatura do solo

verificada na entrelinha, decorrente da presença da palhada nesta parte da área de plantio, pode ter contribuído para essa menor emissão.

As avaliações realizadas em lavoura de aveia preta, permitiram a identificação do pico de emissão de N_2O aos cinco dias após o plantio. Nessa data foram registradas as maiores concentrações de NO_3^- e queda nas concentrações de NH_4^+ , indicando a nitrificação como a principal fonte de N_2O . A nitrificação autotrófica é a principal fonte de N_2O sob condições aeróbicas, sendo que a oxidação do NH_4^+ é a maior fonte de energia para as bactérias nitrificantes (Prosser e Nicol, 2012). Sendo assim, a PPA de 49 % verificada aos cinco dias após o plantio suporta que o fluxo de N_2O deve ter sido decorrente da nitrificação, considerando-se que 51 % dos poros estavam preenchidos por ar nesta data.

4.2. EMISSÃO DE N_2O AFETADA PELA APLICAÇÃO CONJUNTA DO ADUBO NITROGENADO COM BIOCÁRVÃO NO SOLO

Os fluxos médios de N_2O verificados durante o período de monitoramento foram de 124 e 24,3 $\mu g N m^{-2} h^{-1}$ para o experimento com milho e aveia-preta, respectivamente. A duração da influência da adubação nitrogenada na emissão desse gás de poucas semanas após aplicação bem como as magnitudes registradas estão de acordo com o observado na literatura para ambas culturas (Baggs et al., 2003; Jantalia et al., 2008; Zanatta et al., 2010; Piva et al., 2012; Brevilieri, 2016). O fato da aplicação do adubo nitrogenado ter ocorrido no momento em que as culturas apresentam maior demanda por N, pode ser responsável por restringir a influência do mesmo a um determinado período (Zanatta, 2009).

As quantidades de NO_3^- foram em média 2,4 vezes maior do que as de NH_4^+ nos períodos avaliados. Um dos fatores que pode ser responsável por esse resultado é profundidade de coleta de solo para a determinação do N mineral, que foi realizada a 5 cm de profundidade. Isso, em conjunto com alta suscetibilidade (mobilidade) do NO_3^- à lixiviação, indica que N presente no solo nesta forma se encontra em camadas mais profundas. Em função da sua alta mobilidade no solo, o NO_3^- também é mais disponível para a absorção radicular comparado ao NH_4^+ (Hawkesford et al., 2011), característica que deve ter contribuído para a menor concentração do ânion neste estudo.

4.2.1. Milho

A concentração da ureia na aplicação no sulco foi responsável pelo grande incremento nos picos de emissão de N_2O neste método de aplicação em relação ao N aplicado à lanço, na entrelinha de plantio do milho. Esse feito refletiu-se na emissão acumulada de N_2O , sendo que os maiores valores foram encontrados na entrelinha de plantio. Em consideração apenas dos tratamentos aplicados à lanço, os fluxos e as emissões acumuladas de N_2O foram superiores na linha do que na entrelinha de plantio. A adubação nitrogenada de cobertura pode ter estimulado a mineralização de N da matéria orgânica do solo, como efeito residual da adubação nitrogenada de base que foi realizada na linha (Venterea et al., 2012). Assim, promovendo um aumento na atividade de microrganismos produtores de N_2O .

As emissões acumuladas de N_2O em área total mostraram que a aplicação de N no sulco incrementou em 47 % o fluxo do gás em relação a aplicação à lanço. Durante abertura de sulco para a aplicação dos insumos, houve uma mobilização do solo, o que gerou uma maior aeração. Ainda, nesse método de aplicação, a aplicação concentrada do adubo pode ter favorecido mais o efeito “priming” do que na aplicação à lanço. Nesse efeito, a adição de N (mineral ou orgânico) estimula a flora microbiana a atacar a matéria orgânica do solo liberando formas minerais de N (Cantarella, 2007). O incremento na disponibilidade de substrato para a desnitrificação resultou em maior desempenho em emitir N_2O (Gregorich et al., 2015) onde o fertilizante nitrogenado é aplicado no sulco, mesmo em área total. Aliado a isso, quando o fertilizante é incorporado, há um maior contato com a umidade do solo, isto é, ocorre uma maior exposição deste insumo a sítios anaeróbicos, o que favorece a desnitrificação. Em contrapartida, quando a aplicação é a lanço o N, que se encontra em superfície, fica susceptível a outras formas de perdas de N, como por meio da volatilização de NH_3 , que pode variar entre 14 e 62 % da ureia aplicada no solo (Ros et al., 2005; Rambo et al., 2008; Rojas et al., 2012).

A rápida queda nas concentrações de NH_4^+ e o ápice das concentrações de NO_3^- registrado anteriormente ao pico de emissão de N_2O indicam que a reação com maior contribuição na produção deste gás foi a desnitrificação. Em concordância, a manutenção das PPA acima de 60% em grande parte do período de monitoramento, gerou um ambiente onde as condições de redução microbiológica do NO_3^- são dominantes (Linn e Doran, 1982; Bateman e Baggs, 2005). A direta relação do fluxo de N_2O com a PPA, bem como a influência apenas das baixas concentrações de NH_4^+ nas emissões basais de N_2O , corroboram isso.

4.2.2. Aveia preta

A adubação nitrogenada de cobertura foi responsável pelo pico de emissão de N_2O aos três dias após aplicação, bem como pelo incremento nas concentrações de NH_4^+ e NO_3^- aos três e 12 após a aplicação. O aumento da temperatura do solo (Cantarella, 2007) aos dez dias após aplicação possivelmente teve um efeito complementar nesse estímulo de produção de NH_4^+ pelos microrganismos decompositores da matéria orgânica do solo.

Os valores de PPA, em sua maioria menor que 60%, demonstram que houve uma prevalência de sítios aeróbicos no solo. Sob essas condições, microrganismos obtêm energia da oxidação do NH_4^+ a NO_3^- para a produção de molécula orgânica utilizada em seu metabolismo, na chamada nitrificação (Linn e Doran, 1982; Bateman e Baggs, 2005; Prosser e Nicol, 2012). A relação individual do fluxo de N_2O com a concentrações de NH_4^+ e NO_3^- e a PPA indicam que essa foi a reação que mais emitiu N_2O durante a avaliação. Sob o mesmo raciocínio, quando combinada a influência das variáveis do solo na emissão desse gás, há uma maior participação da concentração de NH_4^+ do que a PPA. A análise de correlação entre as variáveis avaliadas que representam todo o período avaliado como um todo, mostrou dependência da intensidade de NH_4^+ com a intensidade de NO_3^+ . Isso é, o NH_4^+ presente no sistema após a adubação nitrogenada de cobertura influenciou significativamente no NO_3^- produzido ao longo deste período, o que aponta a nitrificação como processo predominante.

4.2.3. Efeito do biocarvão

Para entender o efeito do biocarvão sobre o fluxo de N_2O foi necessário inferir a partir dos resultados obtidos nos dois experimentos realizados.

No experimento com milho, a aplicação de biocarvão no sulco foi capaz de mitigar 43 % do N_2O emitido em consequência da adubação nitrogenada de cobertura sob esta forma de aplicação em área total. Isso representa 502 kg $CO_2eq\ ha^{-1}$ perdido a menos para a atmosfera na forma de N_2O . Quando considerada a emissão acumulada apenas na entrelinha de plantio, esse efeito é ainda maior, atingindo 56 % de redução na emissão. Sob condições de alto fornecimento de N ao solo, a redução no fluxo de N_2O pode variar de 16 % a 91 % com a aplicação de biocarvão (van Zwieten et al., 2010; Zhang et al., 2012; Case et al., 2015; Sun et al., 2017).

Ainda nesse experimento, nenhum efeito da aplicação de biocarvão à lanço foi encontrado na entrelinha ou linha de plantio. Contudo a aplicação do biocarvão no sulco resultou em fluxo de N_2O semelhante aos da aplicação à lanço em área total. A maior emissão

de N_2O influenciada pelo efeito “priming”, como descrito no item anterior, pode ter sido atenuada sob efeito do biocarvão.

Na cultura da aveia preta, a aplicação de biocarvão no solo não influenciou nenhuma das variáveis avaliadas. Semelhantemente, em estudo no qual não se observou efeito do biocarvão na emissão de N_2O após a adubação nitrogenada, a PPA foi significativamente baixa e o fluxo de N_2O se correlacionou com a concentração de NO_3^- , indicando a nitrificação como responsável por produzir este gás (Carvalho et al., 2016). Da mesma forma, quando a emissão de N_2O ocorreu durante a oxidação de NH_4^+ a NO_3^- , diversos estudos concluíram que o biocarvão não é capaz de reduzir o fluxo deste gás a partir solo (Saarnio et al., 2013; Verhoeven e Six, 2014; Keith et al., 2016).

Diante disso, a chave da relação da aplicação do biocarvão no solo com a redução do fluxo de N_2O está na desnitrificação, que consiste na redução do NO_3^- a formas gasosas de N. Vários trabalhos têm observado um aumento da atividade redutora em solo com aplicação de biocarvão. Harter et al. (2013) e Ducey et al. (2013) atribuíram a redução na emissão de N_2O ao incremento na abundância da enzima óxido nitroso redutase na presença de biocarvão, como consequência de uma alteração da composição microbiana do solo que favoreceu o desenvolvimento de bactérias redutoras de N_2O . Complementarmente, os grupos funcionais presentes na superfície do biocarvão podem se ligar a molécula de N_2O facilitando a transferência de elétrons para os microrganismos desnitrificantes do solo (Cayuela et al., 2013a). Sendo assim, o biocarvão favorece o último passo da desnitrificação (conversão do N_2O a N_2) resultando na diminuição da emissão de N_2O (van Zwieten et al., 2010; Cayuela et al., 2013a).

A proximidade espacial entre as moléculas de ureia com o biocarvão parecer ser limitante na ação do mesmo sobre as emissões de N_2O , considerando-se que o biocarvão é pouco móvel no solo. O maior contato biocarvão-fertilizante pode garantir que os grupos funcionais presentes na superfície do carvão tenham maior eficiência no seu efeito sobre o solo. Esse contado pode ocorrer, principalmente, por meio da aplicação conjunta dos insumos ou da utilização de doses maiores de biocarvão, assegurando que sua distribuição seja completa ao longo da área de interesse. Alho et al. (2012) verificaram que doses maiores do que 5 Mg ha^{-1} são capazes de mitigar a emissão de N_2O associada a fertilização com N, ainda Bruun et al., (2011) observou que apenas a aplicação conjunta de uma dose alta de biocarvão com a fonte de N é capaz de reduzir esta emissão, sendo que ambos estudos foram conduzidos em condições nas quais a desnitrificação prevalece.

A disponibilidade de N à ação microbiana é afetada pelo uso no biocarvão do solo (Clough et al., 2013), reduzindo o substrato das reações de nitrificação e desnitrificação. A adsorção de NO_3^- pelo biocarvão é possível pela existência de grupos funcionais cromenos, cetonas e pironas (Montes-Morán et al., 2004), sendo que o NO_3^- pode se ligar ao biocarvão por uma ponte usando a carga residual de atração eletrostática ou ainda por meio de ponte de cátions divalentes (principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+}) (Mukherjee et al., 2011). Confirmando isso, Dempster et al. (2012) identificaram um incremento na adsorção de NO_3^- em experimentos da sorção aquosa em solos, ainda Knowles et al. (2011) e Bruun et al. (2011) verificaram uma menor quantidade de NO_3^- extraível em solo com biocarvão. Contudo, neste atual estudo, não foram encontradas diferença nas concentrações de NO_3^- na presença ou não de biocarvão em nenhum dos experimentos realizados (milho e aveia preta).

5. CONCLUSÕES

O biocarvão tem potencial de reduzir a emissão de N_2O associada a adubação nitrogenada de cobertura no milho aplicada no sulco (redução de 43% neste estudo), supostamente por influência na desnitrificação. Contudo, para aplicação à lanço não se verifica tal redução.

A aplicação do adubo nitrogenado à lanço para a cobertura do milho emite menos N_2O em comparação a aplicação no sulco.

O uso de diferentes doses de biocarvão não influencia na emissão de N_2O a partir do solo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A emissão de N_2O a partir do solo é regulada por processos microbiológicos complexos altamente influenciados por fatores ambientais e pelo manejo do solo. Nesse sentido, a avaliação do comportamento dos organismos envolvidos na emissão desse gás, na forma de atividade microbiológica, determinação do DNA e das enzimas presentes no solo no momento da emissão, é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de estratégias de mitigação da emissão de N_2O .

O efeito da aplicação de biocarvão no solo sobre a emissão de N_2O está condicionado a diversos fatores, além de não se ter conhecimento do período pelo qual é possível se verificar este efeito. Tendo vista o alto custo de produção do biocarvão, um melhor entendimento do efeito residual do insumo é fundamental para avaliar a sua viabilidade de utilização, seja em

termos operacionais, econômicos e ambientais. Além disso, as características do biocarvão são tão variáveis quanto são as de suas matérias primas, sendo assim a sua composição química é determinante ao mesmo modo que é o seu contato com o solo. Dessa maneira, o desenvolvimento de tecnologias de aplicação que garantam o máximo contato biocarvão-adubo e utilização de doses mínimas do biocarvão, como por exemplo na forma de grânulos de adubo revestido pelo carvão, pode aumentar a eficiência a campo promovendo melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- Alho CFBV, Cardoso A da S, Alves BJR, Novotny EH. Notas Científicas Biochar and soil nitrous oxide emissions. 2012;722–725.
- Baggs EM, Stevenson M, Pihlatie M, Regar A, Cook H, Cadisch G. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertiliser under zero and conventional tillage. *Plant and Soil*. 2003;254:361–370.
- Bateman EM, Baggs EJ. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils*. 2005;379–388.
- Berglund LM, Deluca TH, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*. 2004;36:2067–2073.
- Brevilieri RC. Carbono, nitrogênio e fluxos de óxido nitroso e metano em Latossolo subtropical sob sistemas de preparo e níveis de adubação. [tese] Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2016.
- Bruun EW, Müller-Stöver D, Ambus P, Hauggaard-Nielsen H. Application of biochar to soil and N₂O emissions: Potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. *European Journal of Soil Science*. 2011;62:581–589.
- Carvalho MDM, Madari BE, Bastiaans L, Oort PAJ Van, Leal WGO, Souza DM, Santos RC, Matsushige I, Maia AHN, Heinemann AB, Meinke H. Nitrogen availability, water-filled pore space, and N₂O-N fluxes after biochar application and nitrogen fertilization. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2016;1203–1212.
- Case SDC, McNamara NP, Reay DS, Stott AW, Grant HK, Whitaker J. Biochar suppresses N₂O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd; 2015;81:178–185.
- Cayuela ML, Jeffery S, van Zwieten L. The molar H:C_{org} ratio of biochar is a key factor in

mitigating N₂O emissions from soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Elsevier B.V.; 2015;202:135–138.

Cayuela ML, Sánchez-Monedero MA, Roig A, Hanley K, Enders A, Lehmann J, Sanchez-Monedero MA. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? *Scientific Reports*. 2013a;3:1732.

Cayuela ML, van Zwieten L, Singh BP, Jeffery S, Roig A, Sánchez-Monedero M a. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V.; 2013b;191:5–16.

Ceretta CA, Basso CJ, Flecha AMT, Pavinato PS, Vieira FCB, Mai MEM. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2002;26:163–171.

Clough T, Condon L, Kamman C, Müller C. A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. *Agronomy*. 2013;3:275–293.

Dempster DN, Jones DL, Murphy D V. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. *Soil Research*. 2012;50:216–221.

Ducey TF, Ippolito JA, Cantrell KB, Novak JM, Lentz RD. Addition of activated switchgrass biochar to an aridic subsoil increases microbial nitrogen cycling gene abundances. *Applied Soil Ecology*. Elsevier B.V.; 2013;65:65–72.

Fontoura SMV, Bayer C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro-sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2009;33:1721–1732.

Fox TA, Chapman L. Engineering geo-engineering. *Meteorological Applications*. 2011;18:1–8.

Gomes J. Emissão de gases de efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por

sistemas conservacionistas de manejo do solo [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2006.

Gomes J, Bayer C, de Souza Costa F, de Cássia Piccolo M, Zanatta JA, Vieira FCB, Six J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil and Tillage Research*. 2009;106:36–44.

Gregorich E, Janzen HH, Helgason B, Ellert B. Nitrogenous Gas Emissions from Soils and Greenhouse Gas Effects. *Advances in Agronomy*. 2015. p. 39–74.

Hambridge J. QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis. Loveland: Lachat Instruments; 2007. [a]

Hambridge J. QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput). Loveland: Lachat Instruments; 2007. [b]

Harter J, Krause H, Schuettler S, Ruser R, Fromme M, Scholten T, Kappler A, Behrens S. Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. *The ISME Journal*. Nature Publishing Group; 2013;1–15.

Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Müller IS, White P. Functions of Macronutrients [Internet]. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. Elsevier Ltd; 2011.

Jantalia CP, dos Santos HP, Urquiaga S, Boddey RM, Alves BJR. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2008;82:161–173.

Keith A, Singh B, Dijkstra FA, Ogtrop F Van. Biochar Field Study: Greenhouse Gas Emissions, Productivity, and Nutrients in Two Soils. *Agronomy, Soils & Environmental quality*. 2016;1805–1815.

Knowles OA, Robinson BH, Contangelo A, Clucas L. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V.; 2011;409:3206–3210.

Linn DM, Doran JW. Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*. 1982;1267–1272.

McBeath A V., Smernik RJ, Krull ES, Lehmann J. The influence of feedstock and production temperature on biochar carbon chemistry: A solid-state ^{13}C NMR study. *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd; 2014;60:121–129.

Montes-Morán MA, Suárez D, Menéndez JA, Fuente E. On the nature of basic sites on carbon surfaces : An overview. *Carbon*. 2004;42:1219–1225.

Mukherjee A, Lal R. Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*. 2013;313–339.

Mukherjee A, Zimmerman AR, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*. Elsevier B.V.; 2011;163:247–255.

Nguyen TTN, Xu C, Tahmasbian I, Che R, Xu Z, Zhou X, Wallace HM, Hosseini S. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen : A review and meta-analysis. *Geoderma*. Elsevier B.V.; 2017;288:79–96.

Novotny EH, Maia CMBDF, Carvalho MTDM, Madari BE. Biochar: Pyrogenic Carbon for Agricultural Use - a Critical Review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2015;39:321–344.

Parkin T, Mosier A, Smith J, Venterea R, Reicosky D, Doyle G, Mccarty G. USDA-ARS GRACEnet chamber-based trace gas flux measurement protocol. Protocol 1 ed Washington DC, USDA-ARS Gracenet. 2014.

Piva JT, Dieckow J, Bayer C, Zanatta JA, Moraes A de, Pauletti V, Tomazi M, Pergher M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant and Soil*. 2012;359–373.

Pöttker D, Wiethölter S. Épocas E Métodos De Aplicação De Nitrogênio Em Milho Cultivado No Sistema Plantio Direto. *Ciência Rural*. 2004;34:1015–1020.

Prosser JI, Nicol GW. Archaeal and bacterial ammonia-oxidisers in soil: The quest for niche specialisation and differentiation. *Trends in Microbiology*. Elsevier Ltd; 2012;20:523–531.

Rambo L, Silva PRF da, Strieder ML, Delatorre CA, Bayer C, Argenta G. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e de planta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2008;43:401–409.

Rojas CAL, Bayer C, Fontoura SMV, Weber MA, Vieiro F. Volatilização de Amônia da Ureia Alterada por Sistemas de Preparo de Solo e Plantas de Cobertura Invernais no Centro-Sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2012;261–270.

Ros CO Da, Aita C, Giacomini SJ. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo , no sistema plantio direto 1. *Ciência Rural*. 2005.

Saarnio S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly affects N₂O emissions via soil moisture and plant N uptake. *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd; 2013;58:99–106.

Shrewsbury LH, Smith JL, Huggins DR, Carpenter-Boggs L, Reardon CL. Denitrifier abundance has a greater influence on denitrification rates at larger landscape scales but is a lesser driver than environmental variables. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016;103:221–231.

Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A. Exchange of greenhousegases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*. 2003;54:779–791.

Smith P, Harper R, Pan G, West PC, Clark JM. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*. 2016;1008–1028.

Sohi SP. Carbon storage with benefits. *Science*. 2012;338:1034–1036.

Sun Z, Sanger A, Rebenburg P, Lentzsch P, Wirth S, Kaupenjohann M, Meyer-aurich A. Contrasting effects of biochar on N₂O emission and N uptake at different N fertilizer levels on a temperate sandy loam. *Science of the Total Environment*. The Authors; 2017;578:557–565.

van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Downie A, Berger E, Rust J, Scheer C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol. 2010;555–568.

Venterea RT, Halvorson AD, Kitchen N, Liebig MA, Cavigelli MA, Grosso SJ Del, Motavalli PP, Nelson KA, Spokas KA, Singh BP, Stewart CE, Ranaivoson A, Strock J, Collins H. Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems In a nutshell : 2012.

Verhoeven E, Six J. Biochar does not mitigate field-scale N₂O emissions in a Northern California vineyard: An assessment across two years. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V.; 2014;191:27–38.

Wrage N, Velthof GL, Van Beusichem ML, Oenema O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry*. 2001;33:1723–1732.

Zanatta JA. Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.

Zanatta JA, Bayer C, Vieira FCB, Gomes J, Tomazi M. Nitrous oxide and methane fluxes in south Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2010;34:1653–1665.

Zhang A, Bian R, Pan G, Cui L, Hussain Q, Li L. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy : A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*. Elsevier B.V.; 2012;127:153–160.

Zhang D, Yan M, Niu Y, Liu X, Zwieten L Van, Chen D, Bian R, Cheng K, Li L, Joseph S, Zheng J, Zhang X, Zheng J, Crowley D, Filley TR, Pan G. Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V.; 2016;226:25–32.

Zhang H, Voroney RP, Price GW. Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd; 2015;83:19–28.

APÊNDICES

Apêndice 1. Densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), macroporosidade (Macropor.), microporosidade (Micropor.) e porosidade total (α) do solo na entrelinha e linha de plantio do milho e em área total para nitrogênio aplicado à lanço (N Lanço) e no sulco (N Sulco) e em conjunto com biocarvão (Bc) à lanço (N+Bc Lanço) e no sulco (N+Bc Sulco). Pinhais-PR, 2016.

Tratamento	Ds (g cm ⁻³)	Dp	Macropor.	Micropor. (cm ³ cm ⁻³)	α
-----Entrelinha-----					
N Lanço	0,92a	2,30ab	0,32a	0,28 a	0,60a
N Sulco	0,94a	2,36ab	0,33a	0,27a	0,60a
N+Bc Lanço	0,90a	2,47a	0,37a	0,27a	0,64a
N+ Bc Sulco	0,89a	2,23b	0,36a	0,27a	0,63a
-----Linha-----					
N Lanço	0,93a	2,39a	0,34a	0,27a	0,61a
N Sulco	0,91a	2,40a	0,35a	0,27a	0,62a
N+Bc Lanço	0,89a	2,23a	0,33a	0,27a	0,60a
N+ Bc Sulco	0,92a	2,35a	0,34a	0,27a	0,61a
-----Área Total-----					
N Lanço	0,93a	2,33a	0,33a	0,27a	0,60a
N Sulco	0,92a	2,39a	0,35a	0,27a	0,61a
N+Bc Lanço	0,89a	2,42a	0,36a	0,27a	0,63a
N+ Bc Sulco	0,91a	2,29a	0,33a	0,27a	0,60a